



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

NATALIA NAZARKO
KATTILALAITOKSEN TERÄSRUNGON SUUNNITTELUN
TEHOSTAMINEN AIKAISEMPIEN PROJEKTIEN AVULLA

Diplomityö

Tarkastaja: Dosentti Kristo Mela
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
25. toukokuuta 2018

TIIVISTELMÄ

NAZARKO, NATALIA: Kattilalaitoksen teräsrungon suunnittelun tehostaminen aikaisempien projektien avulla
 Tampereen teknillinen yliopisto
 Diplomityö, 59 sivua, 5 liitesivua
 Marraskuu 2018
 Rakennustekniikan koulutusohjelma
 Pääaine: Rakennesuunnittelu
 Tarkastaja: Dosentti Kristo Mela

Avainsanat: teräsrakenteet, teräsrunko, kattilalaitos, teollisuusrakentaminen, massalaskenta, massa-arvio

Tämän tutkimuksen tilaajana toimineella yrityksellä on pitkä kokemus teräsrunkoisten kattilalaitosrakennusten suunnittelusta. Jotta voidaan suunnitella uutta laadukkaasti, on välttämätöntä tietää, mitä ja miksi on tehty aiemmin. Arvokkaan työkokemuksen siirtämiseen on perustettu sisäinen *excel*-pohjainen kattilalaitosten tietokanta.

Tutkimusmenetelminä käytettiin sekä kvantitatiivista että kvalitatiivista tutkimusta. Kvantitatiivinen tutkimus käsitti datatietojen keruuta käymällä läpi projektikansioita ja täydentämällä kattilalaitosten tietokantaa, mm. teräsmääräluvuilla kg/m^3 , tehokkuusluvuilla kg/h ja yksityiskohtaisilla tiedoilla, kuten profiilien valinnoilla, kuormatiedoilla ja liitostyypeillä. Kvalitatiivinen tutkimus toteutettiin asiantuntijahaastattelujen muodossa. Haastatteluihin kutsuttiin teollisuusprojektien lujuuslaskijoita, projekti- sekä osastopäälliköitä. Haastatteluilla pyrittiin vastaamaan kysymyksiin, mikä on suurin haaste kattilalaitosrakennusten suunnittelutyössä: mikä oli mennyt hyvin tai huonosti ja mitä erikoisuuksia oli tullut vastaan kussakin projektissa. Tutkimusten data analysoitiin tilastollisin menetelmin.

Tutkimuksen tuloksena saatiin päivitetyt kattilalaitosrakennusten teräsrunkojen teräsmääräluvut (kg/m^3) ja tehokkuusluvut (kg/h) sekä paljon yksityiskohtaisia tietoja toteutuneista kattilalaitosprojekteista sekä kehitysideoita. Tietokantaan on kirjattu myös haastatteluista ilmi tulleet huomiot. Suunnittelutyön suurimpana haasteena koettiin lähtötietojen muutosten suuri määrä, mikä johtaa monikertaisiin suunnitelmien päivityksiin. Toiseksi yleisempänä kommenttina oli ollut suunnittelun haaste uudessa maassa johtuen paikallisista normeista. Kolmanneksi kommentiksi nousi aikataulujen tiukkuus.

Tutkimuksen lopuksi esitettiin esimerkki kattilalaitosrakennuksesta, jonka teräsmääräarvio arvioitiin esimitoittamalla erilliset rakenneosat sisäisellä teräsprofiilien laskentapohjalla sekä *Robot Structures Analysis* -ohjelmalla ja mallintamalla koko kattilarakennus *Tekla Structures* -ohjelmaan. Saatua teräsmääräarviota vertailtiin vastaavanlaiseen projektiin, joka oli jo olemassa sisäisessä kattilalaitosten tietokannassa.

ABSTRACT

NAZARKO, NATALIA: Optimization of the design of steel structure boiler building through previous projects

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 59 pages, 5 Appendix pages

November 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural engineering

Examiner: Docent Kristo Mela

Keywords: steel structures, steel frame, boiler building, industrial building, mass calculation, mass estimate

The company that has been the subscriber of this study has long experience of designing steel structured buildings for boiler plants. To design a new building with quality, it is necessary to know what and why has been done in the past. An internal excel-based boiler plant database has been set up to share valuable work experience between co-workers.

Both quantitative and qualitative research were used as research methods. The quantitative study consisted of collecting data from project folders and of gathering and supplementing the boiler plant database with steel volume numbers (kg/m^3), efficiency numbers (kg/h) and detailed data such as profile sections, load data and connection types. A qualitative study was conducted in the form of expert interviews such as main designers, project managers and department managers. Interviewees were asked questions, which is the biggest challenge in the design work of boiler plants building: what had gone well or wrong and what specialties had come against. The data of the studies were analyzed by statistical methods.

The result of this study was the updated numbers of steel building volumes (kg/m^3) and the efficiency numbers (kg/h), a lot of detailed data and development proposals. The comments on the interviews have also been recorded in the database. According to interviews results, the main challenge for the design work was the large number of changes in the initial data, which leads to multiple updates of the design documentation. Second most general comment was about design challenge in the new country because of unusual design code and local requirements. Third was a comment about tough scheduling for design work.

At the end of the study, there is an example of steel structured boiler building, which steel volume was estimated by predesign of separate parts in calculation template excel and Robot Analysis -software and modelling the whole building in Tekla Structures -software. This pre-estimated volume of steel was compared to a similar project already found in the internal excel-based boiler plant database.

ALKUSANAT

Hiukan pitkittynyt maisterivaiheeni alkaa olla loppusuoralla. Haluan kiittää työnantajaani Sweco Rakennetekniikka Oy:tä mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja joustavuudesta koko opiskeluaikanani.

Erikoiskiitokset kuuluvat TTY:ltä tarkastajana toimineelle dosentti Kristo Melalle ja työnantajan puolesta ohjaajana toimineelle tekniikan tohtori Jussi Jalkaselle. Osastopäällikkömme DI Teemu Hyvärinen ansaitsee kiitoksen erityisesti diplomityön järjestelyistä. Kiitän kaikkia haastatteluihin osallistuneita työkavereita: teidän työpanos on ollut korvaamaton. Kiitokset myös teräsosastomme huikealle porukalle: on ilo jakaa työarki juuri teidän kanssa!

Taustatuesta haluan kiittää rakasta aviomiestäni ja tytärtäni sekä minun vanhempiani. Kiitos Sanna-Marialle hätäkutsuun vastaamisesta.

Tampereella, 16.11.2018

Natalia Nazarko

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tausta.....	1
1.2	Tavoitteet	2
1.3	Rajaukset.....	2
1.4	Tutkimusmenetelmät	3
2.	TOTEUTUNEET PROJEKTIT	4
2.1	Yleisesti.....	4
2.2	Tarjous- ja esisuunnitteluvaiheet	7
2.3	Päärungon suunnittelun vaihe	8
2.3.1	Laskentaperusteet.....	8
2.3.2	Profiilit ja teräslaji.....	9
2.3.3	Jäykistysjärjestelmät	9
2.4	Detaljivaihe	13
2.4.1	Liitokset yleisesti	13
2.4.2	Esimerkkejä liitoksista	15
3.	TUTKIMUSAINEISTO	18
3.1	Projektikansioiden läpikäynti.....	19
3.2	Haastattelut.....	27
3.3	Tulokset.....	29
4.	KEHITYSKOHDAT	31
4.1	Kattilalaitosten tietokanta	31
4.2	Suunnitteluvirheiden ja ylitoimituksen välttäminen.....	34
4.3	Projektijohdolliset seikat.....	35
4.4	Hyviksi todetut liitosratkaisut	35
5.	ESIMERKKI: KATTILALAITOKSEN MASSA-ARVIO.....	39
5.1	Lähtötiedot	39
5.2	Massa-arvio esimitoituksen ja tietokannan avulla.....	39
5.2.1	Sekundääripalkki	41
5.2.2	Tason primääripalkit	43
5.2.3	Kattopalkki	45
5.2.4	Betonitason WQ-palkki.....	46
5.2.5	Keskipilarit B/4 – B/6	47
5.2.6	Seinäpilarit A4/A5	49
5.2.7	Pystysuuntainen jäykistysjärjestelmä.....	51
5.3	Massa-arvio ja yhteenveto	53
6.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	56
6.1	Yhteenveto	56
6.2	Tulokset.....	56
6.3	Johtopäätökset ja jatkotutkimusehdotukset.....	56
	LÄHTEET	58

LIITE A: TERÄSKILOJEN JAKAUMA TERÄSOSIEN VÄLILLÄ TERÄSRAKEN-
TEISISSA KATTILALAITOSRAKENNUKSISSA

LIITE B: HAASTATTELUISTA ILMI TULLEET VÄITTEET

LIITE C: ESIMERKKI TIETOKANTAAN KERÄTYISTÄ TIEDOISTA

LIITE D: CASE STUDY: LÄNSI-EUROOPPALAISEN KATTILALAITOSRAKEN-
NUKSEN MASSOITTELU TIETOKANNAN JA ESIMITOITUKSEN AVULLA

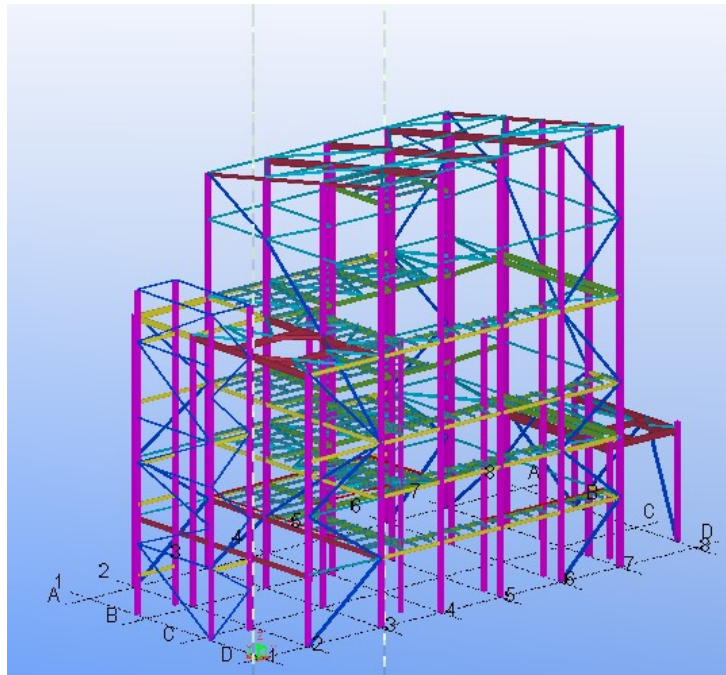
LYHENTEET JA MERKINNÄT

AISC	eng. <i>The American Institute of Steel Construction</i>
ANSI	eng. <i>The American National Standards Institute</i>
basic-vaihe	teräsrunkoisen rakennuksen suunnittelun vaihe, jolloin rungon teräsprofiilit ovat määritetyt
BFB	eng. <i>Bubbling Fluidized Bed</i> , kerroleijukattila
BIM	eng. <i>Building Information Model</i>
CFB	eng. <i>Circulating Fluidized Bed</i> , kiertoleijukattila
CFRHS	kylmämuovattu teräsputkiprofiili
Design Criteria	suunnitteluperusteiden erittelytiedosto
detail-vaihe	teräsrunkoisen rakennuksen suunnittelun vaihe, jolloin rungon teräsprofiilien väliin suunnitellaan liitokset ja tuotetaan valmistuspiirustukset
DL	eng. <i>dead load</i> , pysyvä kuorma
EC	eng. <i>Eurocode</i> , Eurokoodit, kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja Eurooppaan suunniteltaessa
F	pistekuorma
FEM	eng. <i>Finite Element Method</i> , elementtimenetelmä
HEA	kuumavalssattu I-muotoinen avoprofiili
HEB	kuumavalssattu I-muotoinen leveälaippainen avoprofiili
IPE	kuumavalssattu I-muotoinen kapealaippainen avoprofiili
kg/h -luku	suunnittelun tehokkuusluku, montako kg rungon terästä saadaan suunniteltua työtunnissa
kg/m ³ -luku	teräsmääräluku, montako kiloa rungon terästä rakennuksen kuutiometrissä
kk	kuukausi
kN	kilonewton, kuorman yksikkö
kN/m	kilonewton/metri, viivakuorman yksikkö
kN/m ²	kilonewton/neliömetri, tasokuorman yksikkö
kNm	kolonewtonmetri, taivutusmomentin yksikkö
KRT	käyttörajatila
L	rakenneosan jänneväli
LL	eng. <i>live load</i> , hyötykuorma
L _y	rakenneosan nurjahduspituus profiilin heikompaan suuntaan
L _z	rakenneosan nurjahduspituus profiilin vahvempaan suuntaan
m	metri, pituuden yksikkö
M	taivutusmomentti
m/s	metriä sekunnissa, nopeuden yksikkö
m ³	kuutiometri, tilavuuden yksikkö
Mpa	megapascal, jännityksen yksikkö
MRT	murtorajatila
NDT	eng. <i>Non-destructive testing</i> , ainetta rikkomaton testaus
p _v	päivä
q	viivakuorma
S355	teräslaji, jonka myötöraja on 355N/mm ²

SN	eng. <i>Snow Load</i> , lumikuorma
SNIP	ven. <i>Stroitelnye normy i pravila</i> , Rakentamisen ohjeet ja säännöt
SQL-database	eng. <i>Structured Query Language database</i> , SQL-ohjelmointikieleen perustuva relaatiotietokanta
UNP	U-muotoinen avoprofiili
v	vuosi
WB	<i>welded beam</i> , hitsattu palkkiprofiili
WI	<i>welded I beam</i> , hitsattu I-muotoinen profiili
WIND	eng. <i>Wind Load</i> , tuulikuorma
WQ	hitsattu koteloprofiili

1. JOHDANTO

1.1 Tausta



Kuva 1. Tyypillisen kattirakennuksen teräsrunгон tietomalli. Vasemmalla porrastorni, keskellä kattilarakennus ja kyljissä siilojen tuentarakenteet.

Vuosien varrella Sweco Rakennetekniikka on suunnitellut lukuisia kattilalaitosten rakennusten teräsrunkoja (Kuva 1) useisiin maihin. Tietoa, taitoa ja osaamista on paljon. Pääongelmana on tiedon ja taidon huono liikkuvuus eli se, että aikaisemmin hyviksi tai huonoiksi havaitut suunnitteluratkaisut eivät siirry kokeneemmilta työntekijöiltä uusille. Ilman tietoa, mitä aiemmin on tehty, uusi työntekijä joutuu aloittamaan aina alusta. Talon käytäntöihin tutustumiseen menee oma aikansa.

Tämän työn ensisijaisina tietolähteinä ovat asiantuntijahaastattelut sekä toteutuneiden projektien läpikäynti. Datan kerääminen yhteiseen tietokantaan jo toteutuneista projekteista on tutustumista aiheeseen. Tämän jälkeen pohditaan, miten tätä tietoa voidaan hyödyntää jatkossa ja kartoitetaan mitä työkaluja sekä toimenpiteitä vielä tarvitaan suunnittelun tehostamiseksi. Lopuksi suunnitellaan työkaluja tai tehdään ehdotuksia jatkokehitystä varten.

Data on esitetty diplomityössä pääpiirteissään seuraavasti: projektit numerojärjestyksessä ja henkilö- sekä yksilöivät tiedot piilotettuina. Diplomityö on luonteeltaan toiminnan

eli suunnittelutyön kehittämistä. Työssä pureudutaan suunnitteluongelmiin ja niiden ratkaisuihin. Liitosten osalta tuodaan esille tavanomaisimpien liitosten eri variaatiot ottaen huomioon standardien, maakohtaiset ja tilaajan vaatimukset.

1.2 Tavoitteet

Tämän diplomityön ensisijainen tavoite on tuoda jo olemassa oleva tieto toteutuneista kattilalaitosprojekteista kaikkien firman sisällä olevien käyttöön. Toinen tärkeä tavoite on selvittää, kuinka suunnittelutyötä voidaan kehittää. Osastojen keskinäistä yhteistyötä ja tiedon saatavuutta pyritään näin ollen parantamaan. Lisäksi tavoitteena on ollut tuoda esille suunnittelun epäkohdat ja löytää parannusehdotukset. Projekti hyödyntää sekä tarjoustentekijää, laskijoita, projektipäälliköitä että detaljisuunnittelijoita.

Työn avulla tarjoustentekijä osaa tehdä totuudenmukaisia tarjouksia teräsrungon massan osalta. Toteutuneiden projektin jälkilaskennan massojen tiedot päivitetään ajan tasalle ja saadaan uudet teräsmääräluvut (kg/m^3) sekä tehokkuusluvut (kg/h). Vertaamalla omia profiilivalintoja, suunnitteluratkaisuja tai laskentaperusteita aiempiin projekteihin kattilalaitoksen lujuuslaskija osaa tehdä järkeviä suunnitteluvalintoja rungon osalta välttämättä ylittämistä. Sisäisestä kattilalaitosten tietokannasta projektipäällikkö osaa poimia nopeasti tarvittavia tietoja ja vertailla niitä keskenään. Detaljisuunnittelija osaa mallintaa kohteeseen sopivimmat liitokset. Pohjautuen tietoon, mitä ja miksi on tehty aikaisemmin, voidaan välttyä monilta ongelmilta, mm. samojen virheiden toistalta ja epäedullisilta ratkaisuilta.

1.3 Rajaukset

Kattilalaitosten tietokantaan kerätään tietoja ainoastaan Sweco Rakennetekniikan Tampereen toimipisteessä suunnitelluista kattilalaitoskohteiden teräsrungoista. Syynä on projektien paljous valtakunnallisella tasolla. Lisärajausena on se, että tietoja kerätään ainoastaan projekteista, jotka ovat edenneet detaljivaiheeseen. Keskeneräisiä ja *basic*-vaiheeseen jääneitä projekteja ei käsitellä. Teräsmääräluvut kg/m^3 (=kattilarakennuksen massa jaettuna kattilarakennuksen tilavuudella) kerätään ainoastaan kattilarakennuksista eikä kohteiden muita rakennuksia huomioida. Tehokkuusluvut kg/h (=montako kiloa terästä saadaan suunniteltua tunnissa, käsittäen profiili- ja liitosmitoituksen konepajakuviin asti) kerätään projekteista, joista ne on mahdollista saada aikapankkijärjestelmä muuttumisen johdosta. Asiantuntijahaastatteluihin kutsutaan ainoastaan päälaskijat ja projektipäälliköt sekä muutama osastopäällikkö. Tässä työssä kiinnitetään huomio myös siihen, millaiset liitokset on toteutettu. Kerättyjä tietoja ja lukuja esitellään projekti- sekä henkilötiedot piilotettuina.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Tämän työn tutkimusmenetelminä ovat sekä laadullinen eli kvalitatiivinen että kvantitatiivinen eli määrällinen tutkimus. Tiedon keruu toteutuneiden kattilalaitosten projektiansioista on kvantitatiivista tutkimusta ja asiantuntijoiden teemahaastattelut ovat kvalitatiivista tutkimusta. Tiedon keruussa on tärkeätä kyky löytää relevantti tieto valtavasta tietomäärästä. Osa tiedoista oli vaikeuksia päästä käsiksi, johtuen projektien arkistoinnista ja tietomallien kirjoitusoikeuksista.

Haastattelut olivat strukturoimattomia (ns. vapaita keskusteluja) teemahaastatteluita. Haastatteluihin oli kutsuttu kattilalaitoksia suunnittelevia asiantuntijoita: projektipäälliköitä, lujuuslaskijoita ja osastopäälliköitä. Haastattelujen olennaisimmat kysymykset olivat, mitä kussakin projektissa on ollut erikoista, missä onnistuttiin ja mikä meni pieleen. Lisäksi keskusteltiin onnistumisiin ja epäonnistumisiin johtaneista syistä ja kuinka ne olisivat olleet ennakoitavissa. Haastattelujen tulokset analysoitiin yhteisten piirteiden löytämiseksi ja kehityskohtien paljastamiseksi. Haastattelujen muistiinpanot tallennetaan firman yhteiseen kansioon sellaisinaan, tietokantaan projektien erikoispiirteinä ja haastattelujen anti on esitetty tässä työssä taulukkomuodossa.

Toteutuneiden projektien sisäinen tietokanta täytettiin sellaisenaan ja osa tiedoista vertailtiin aikaisemmin taulukoituihin kattilarakennusten teräsmääräarvoihin. Lisäksi on tehty joitakin tilastotieteeseen perustuvia analyysejä (mm. on esitetty taulukko teräskilojen prosentuaalisesta jakaumasta laitoksessa). On pohdittu, kuinka jotkut tyypilliset projektien ominaispiirteet, jotka on kuvailtu luvussa 2.1, vaikuttavat lopulta teräsmenekkiin. Tässä tutkimuksessa kiinnitettiin erityishuomio käytettyihin tyypillisiin liitostyyppeihin, varsinkin seinäsideliitoksiin.

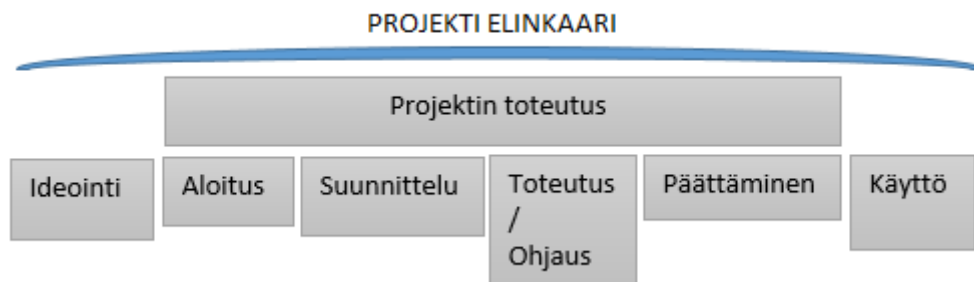
Kokemuseräisesti on todettu, että alhaalta tuetun kattilan teräsrunko on kevyempi kuin vastaavan ylhäältä ripustetun kattilan teräsrunko. Lisäksi on huomattu, että maanjäristyksille alttiille alueille rakennettaessa teräsmääräluvut ovat korkeampia. Tässä diplomityössä nämä huomiot koitetaan todistaa tai kumota päivitettyjen tunnuslukujen valossa. Lisäksi kiinnostaa tietää, minkä rakenneosan liitossuunnitteluun menee eniten terästä suhteessa koko rakennuksen runkoon.

Tietokannan käytännön soveltuvuutta suunnittelutyöhön kokeiltiin luvussa 5 ja liitteissä esitetyssä *case study* -tapauksessa. Casen lähtötietoina olivat pohjakuva, perustustason kuormatiedot ja leikkauspiirustus sekä kohteen sijaintimaa. Alussa kattilarakennuksen teräsrungon profiilit arvattiin hyödyntäen tietokantaa, kokemusta, ja esimitoittamalla eriliset päärakenneosat sisäisellä teräslaskentapohjalla [23] sekä jäykistävä pystyristikko *Robot Structural Analysis* -ohjelmalla. Esimitoituksen ohella kattilarakennus mallinnettiin *Tekla Structures* -ohjelmaan. Ehtona oli, etteivät lähtötiedot muutu projektin edistytessä. Lopuksi massa-arvioi vertailtiin tietokannasta löytyvään vastaavaan kattilarakennuksen teräsmassaan.

2. TOTEUTUNEET PROJEKTIT

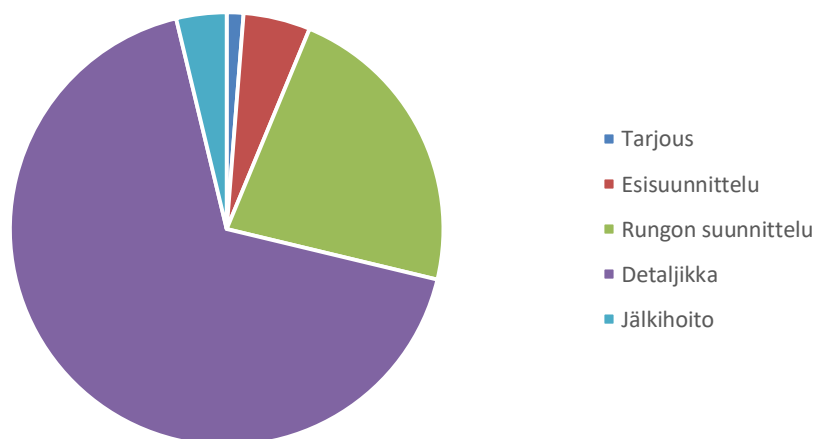
2.1 Yleisesti

Tässä luvussa esitetyt asiat toteutuneista projekteista perustuvat pidettyihin asiantuntija-haastatteluihin, työkokemukseen ja projektikansioiden antiin. Tässä luvussa kuvatut käytännöt ja kokemukset ovat Sweco Rakennetekniikan Tampereen toimipisteen omia. Rakennesuunnittelijan näkökulmasta kattilalaitosprojekti jakautuu tarjous-, esisuunnittelu-, suunnittelu- ja jälkihoitovaiheisiin. Suunnitteluvaihe jakautuu rungon mitoittamiseen ja detaljivaiheeseen (eli liitosten suunnitteluun ja valmistuskuvien tekoon) (Kuva 3). Projektin koko elinkaareen kuuluvat markkinointi, aloitus-, suunnittelu- ja toteutus- sekä päättämisen vaiheet ennen valmiin rakennuksen käyttöönottoa (Kuva 2).



Kuva 2. Projektin elinkaari yleisesti [16].

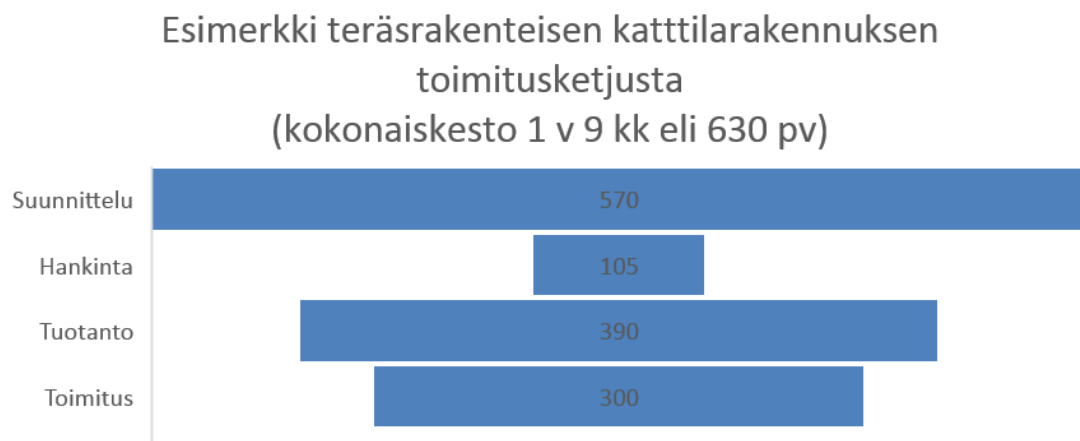
Projektin vaiheet rakennesuunnittelijan kannalta



Kuva 3. Karkea jako kattilalaitosprojektin vaiheista rakennesuunnittelijan kannalta ([9]).

Kattilalaitosprojekteilla on monta yhtenevää ominaisuutta ja toisaalta monta muuttujaa. Jo projektin tarjousvaiheessa on tärkeää tunnistaa, kuinka epätavanomaisesta kohteesta on kyse. Tavanomaiselta vaikuttava kohde saattaa osoittautua erikoiseksi ja aiheuttaa venymistä aikatauluun, myöhästymisiä seuraavissa vaiheissa sekä muille osapuolille ja tämän kautta kasvaneita lisäkustannuksia.

Tyypillinen kattilalaitoksen rakennusten suunnitteluprojekti kestää ajallisesti pari vuotta (Kuva 4) eri vaiheiden olleessa päällekkäisiä. Tavanomaista on, että teräsrungon alimpien kerrosten kokoonpanot valmistetaan jo konepajalla ja jopa asennetaan työmaalla, kun ylimmät kerrokset ovat vasta suunnittelun detaljivaiheessa. Kooltaan kattilarakennusten teräsrungot vaihtelevat 66 000 - 1 900 000 kg välillä. Pienempien laitosten ollessa noin 2 600 m³ ja suurempien 64 000 m³. Tilavuudella tässä tarkoitetaan kattilarakennuksen tilavuutta (korkeus perustamistasosta kattoon x leveys x pituus). Hoitotasojen eli kerrosten lukumäärä vaihtelee 3 – 17 välillä ja korkeuden ollessa 16 - 67 m. [10]



Kuva 4. Esimerkki teräsrungon toimitusketjusta suuressa kattilalaitosprojektissa [9].

Projektin tärkeimpiin heti alussa tarkasteltaviin ominaispiirteisiin kuuluvat: kattilalaitoksen koko, oheisrakennusten olemassaolo, kattilan tyyppi, kattilan tuentatapa ja -tyyppi, rakennusympäristö, suunnitteluperusteet ja normit.

Tiivis ja pieni kattilalaitos ei välttämättä tarkoita pienempää työmäärää detaljivaiheessa tai matalampaa teräsmäärälukua (kg/m³). Isossa laitoksessa jännevälit voivat olla suuria ja teräskiloja on määrällisesti enemmän, mutta pienessä laitoksessa saattaa olla yhtä monta liitosta tai paljon pieniä irto-osia. Kun pieneen laitokseen mahdutetaan kaikki laitteet, joudutaan tekemään paljon kompromisseja. Rakennesuunnittelija on otettava muiden alojen suunnittelijan huomioon. Suunnitteluiterointi on tällöin työlästä. Näin ollen detaljiointiin menevä aika on mahdoton ennustaa ainoastaan teräsmääräluvun (kg/m³) tai kattilalaitosrakennuksen tilavuuden perusteella. Detaljivaihe on suunnittelun eniten aikaa vievä vaihe.

Oheisrakennusten olemassaolo vaikuttaa projektin kokonaisaikatauluun ja resurssien käyttöön. Joskus projektin tarjousvaiheessa suunnittelusopimukseen ei sisälly muita rakennuksia kuin kattilarakennus. Kun projekti on varmaa, siihen kiinnitetään henkilöresursseja. Jos projektin edistyessä tulee lisää rakennuksia suunniteltavaksi, voi olla, ettei siihen ole enää tarpeeksi resursseja käytettävissä. Sopimuksen muutos ei kuitenkaan ole täysin ennustettavissa. Optioina olevat suunnittelutyöt, joille ei ollut varattu resursseja, saattavat aiheuttaa vaikeuksia. [5]

Kattilan tyyppejä on erilaisia ja niiden tuotenimet vaihtelevat valmistajan mukaan, mutta rakenteeltaan yleisimmät höyrykattilatyypit ovat luonnonkierto-, pakkokierto tai läpivirtauskiertokattilat. Ripustetuissa kattiloissa lämpölaajeneminen tapahtuu alaspäin ja alta tuetuissa kattiloissa vastaavasti ylöspäin. [15] Kattilan tuentapa vaikuttaa kattilarakennuksen rungon suunniteluun. Ylhäältä tuetun eli ripustetun kattilan tapauksessa valinta ristikon tai kattilapalkkien välillä saattaa olla ratkaiseva teräskilojen ja asennettavuuden kannalta. Yleisesti kattilapalkit ovat suositumpia, koska suunnitelmat ovat helpompia tehdä ja teräskilojen säästö käyttämällä ristikkoo ei ole niin merkittävä konepajan sijaitessa Euroopassa, jossa työkustannukset ovat korkeat. Kattilan primääristen palkkien profiilien suuruusluokkaa on esitelty Taulukko 1:ssä. Tyypillisesti kattilapalkit ovat hitsattuja profiileita ja korkeudeltaan 2-3 m luokkaa.

Kattilatyypillä on vaikutusta myös sitä kantavaan teräsrunkoon. Siksi rakennesuunnittelijan on hyvä tietää teollisuusprosessien perusteet. Kattilatyypeistä tarkemmin voi lukea esimerkiksi Seppälän diplomityöstä [24]. Toimintaprosessin kannalta kattilalaitokset voidaan jakaa karkeasti kolmeen osaan:

BFB (*Bubbling Fluidized Bed*) eli kerrosleijukattila, joka toimii korkeiden tuhkapitoisuuden polttoaineilla vaihtelevalla palamisarvoilla ja kosteudella.

CFB (*Circulating Fluidized Bed*) eli kiertoleijukattilassa käytetään biomassaa tai fossiilisia polttoaineita. Suurempi lämpöteho verrattuna BFB kattilaan, kuten myös hankinta- ja ylläpitokustannukset.

Soodakattilat ovat paperiteollisuudessa syntyvän mustalipeän hyödyntämistä talteenotettavia höyrykattiloita.

Rakennusympäristö, suunnitteluperusteet ja normisto ovat tiukasti kytköksissä toisiinsa. Pääsääntöiset suunnittelunormit ovat Eurokoodit, *AISC* ja *SNiP (CHuIT)*. Rakennuskohteen maan oma normisto, tilaajan ja loppuasiakkaan vaatimukset määräävät monet asiat suunnittelussa.

Taulukko 1. Esimerkki primääristen kattilapalkkien profiileista
(profiilien lyhenteet selitetty Lyhenteet ja merkinnät -luvussa sekä Kuva 5:ssä. [10])

Primäärisest kattilapalkit	
jänneväli (m)	profiili
6,8	HEB400
7,2	WB1800-16-30x570-25
7,3	WI 500-10-25x350
9,2	WB 950-10-20x500-125
9,2	WB1100-15-35X550-100
11,0	WI2000-20-40x500
11,3	WI3000-30-40X500
11,3	WI2500-25-30x400
11,5	WB2000-25-30X600-175
11,7	WB1650-20-25X500-75
14,2	WI2000-10-25x450
14,7	WB1600-15-50X660-80
14,8	WB2500-25-40X500-25
16,3	WI3400-45-50X550
17,1	WI2600-30-40X600
17,6	WI3200-35-60X550
18,1	WI2100-30-30X570-60X800
19,6	WB1500-15-25x500-25

2.2 Tarjous- ja esisuunnitteluvaiheet

Tarjousvaiheessa asiakkaan ja suunnittelijan kanssa sovitaan yhteisistä pelisäännöistä ja suunnittelulaajuudesta. Useimmiten projektin suunnittelutehtävä sisältää muitakin suunniteltavia rakennuksia kuin kattilarakennuksen. Suunnittelulaajuuteen voivat sisältyä turbiinirakennus, siilorakennukset, erilliset porrastornit, varastorakennukset yms.

Esisuunnitteluvaiheen tavoitteena on esimitoittaa tulevan rakennuksen profiilit ja ilmoittaa perustuskuormat perustussuunnittelijoiden käyttöön. Sillä aikaa, kun suunnitellaan teräsrunkoa loppuun, perustuksia jo toteutetaan.

Design Criteria eli suunnitteluperusteiden erittelytiedosto on äärimmäisen tärkeä projektin sujumisen kannalta. Siinä eritellään ytimekkäästi rungon suunnitteluperusteiden pääkohtia: kattilalaitoksen rungon koko, jäykistysjärjestelmät, käytettävät materiaalit ja profiilit, kuormat, suunnitteluohjeet, taipumat. Useasti *Design Criteria* lähetetään asiakkaalle ainoastaan tiedoksi. Tässä ehdotetaan, että jatkossa se olisi lähetettävä asiakkaalle

ns. hyväksyttäväksi. Kaikki olennaiset muutokset jo kaavailtuihin suunnitteluperusteisiin olisivat lisätoita. Näin välttyttäisiin epäselvyyksiltä ja projektin pääperiaatteet ovat kaikille osapuolille selvät.

2.3 Päärungon suunnittelun vaihe

Teräsrungon mitoitus tapahtuu tavallisesti *FEM*-ohjelmien avulla (*Robot Structural Analysis* tai *RFEM* yms.) Varsinainen tietomallinnus tapahtuu *Tekla Structures* -ohjelmassa, jonka tietoja voi siirtää laskentaohjelmaan ja takaisin. Näin pärjätään yhdellä tietomallilla, joka on aina ajan tasalla sekä lujuuslaskijalla että detaljisuunnittelijalla.

Projektin tarjousvaiheessa uuden kattilarakennuksen runko saattaa vaikuttaa tavanomaiselta. Projekti on voitu sopia jopa toisen projektin kopioksi, mutta loppu viimein se ei välttämättä ole sitä ja näin ollen vaikeuttaa suunnittelutyötä. ”Kopio” ei tuo helpotuksia suunnittelutyöhön, vaan päinvastoin. Identtisten osien määrä vähenee projektin edetessä ja yhä useampia muutoksia tulee esille. Näiden hallinnointi ja eriytyminen tuovat haasteita. Uusi suunnittelumaa tarkoittaa ilman muuta työstä paikallisiin normeihin perehdyttämistä, joka vie aikaa varsinaiselta mitoitukselta. Vaativa asiakas saattaa olla halukas osallistumaan suunnittelupäätöksiin, silloin suunnittelutyö monimutkaistuu jatkuvien hyväksyntöjen ja palaverien myötä. Lähtötietojen viivästymisen on huomattu useasti hankaloittavaksi tekijäksi. Aina, kun varsinainen mitoituksen aloitus myöhästyy syystä tai toisesta, se aika on pois kokonaisaikataulusta. [5]

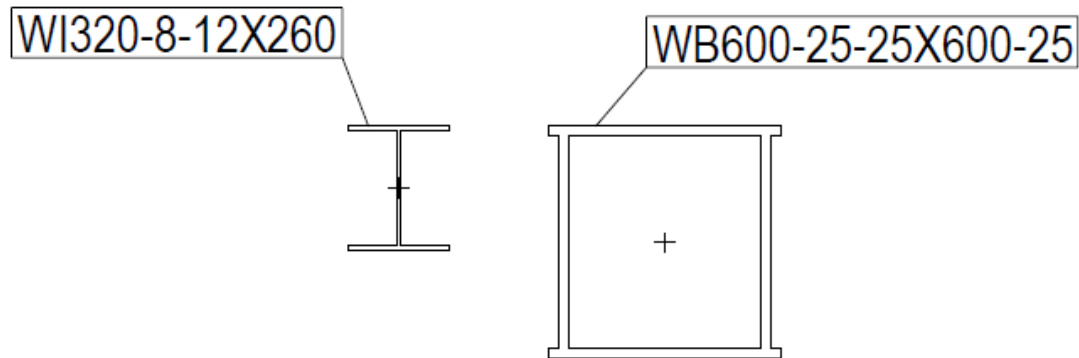
2.3.1 Laskentaperusteet

Alussa projektin lujuuslaskija kartoittaa suunnitteluperiaatteet ja laatii *design criteria* -tiedoston, joka kuvastaa rakenteen pääpiirteet: analyysimenetelmän, suunnittelunormiston, kuormat ja kuormitusyhdistelmät, rakennesysteemin, liitokset ja taipumarajat. Suunnittelumaasta ja paikallismormeista riippuen (*EC*, *AISC*, *SNiP*) päälaskija päättää, mitoitetaanko päärunko maanjäristyskohteena vai ei ja onko mukana muita erikoiskuormia tai huomioitavia seikkoja. Päätös suunnitteluperusteista tehdään yhteisymmärryksessä tilaajan kanssa pohjautuen normistoon, kokemukseen ja yksityiskohtaisiin selvittelyihin. [5] Maanjäristysmitoitukselle voidaan tehdä joitain helpotuksia, vaikka suunnittelualue olisikin seisminen (*Eurocode 8*, konsepti a) [6].

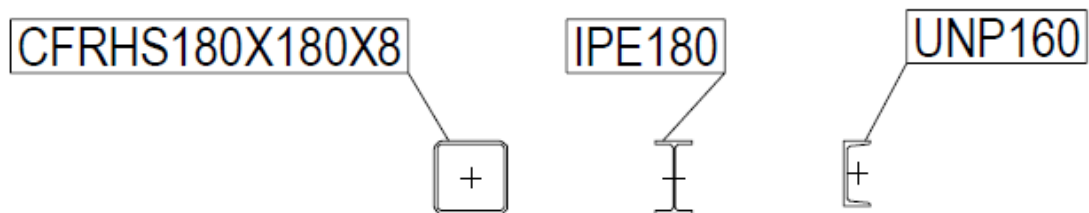
Sisäisen tietokantaan kerätyt kuormien resultantit ovat tärkeitä siinä mielessä, että niiden avulla voidaan tarkistaa *FEM*-laskennan tulosten järkevyys. Leikkausvoiman resultantilla voidaan tarkistaa perustuskuormien suuruusluokkaa. Toki, on myös huomattu, että tärkeät paikat (esim. rakennuksen kokonaisjäykistys ja kattilapalkit) on hyvä mitoittaa käsin laskennalla ensin ja tarkistaa *FEM*-ohjelmalla vasta sitten [5].

2.3.2 Profiilit ja teräslaji

Isoimmat profiilit ovat yleensä hitsattuja I- ja koteloprofiileita (Kuva 5) suurista kuormista ja optimoinnin seurauksesta johtuen. Pienimmät ovat kuumavalssattuja (I ja U) (Kuva 6). Vinositeet ovat tavallisesti kylmämuovattuja rakenneputkiprofiileita.



Kuva 5. Esimerkki hitsatuista profiileista.

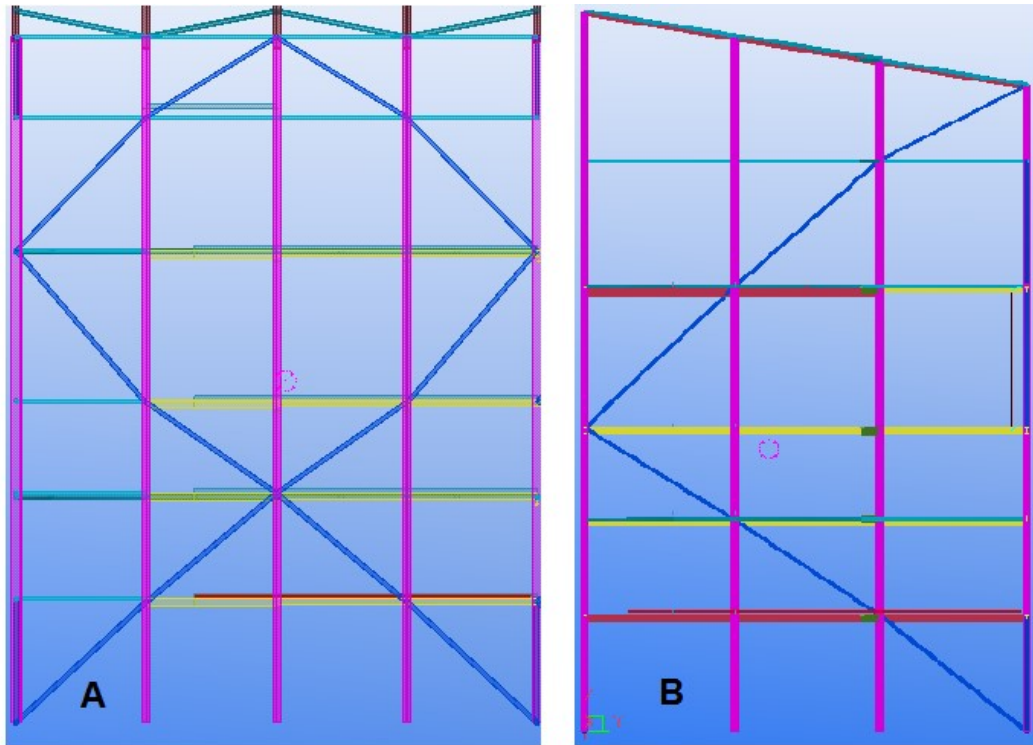


Kuva 6. Esimerkki valssatuista ja muovatuista profiileista.

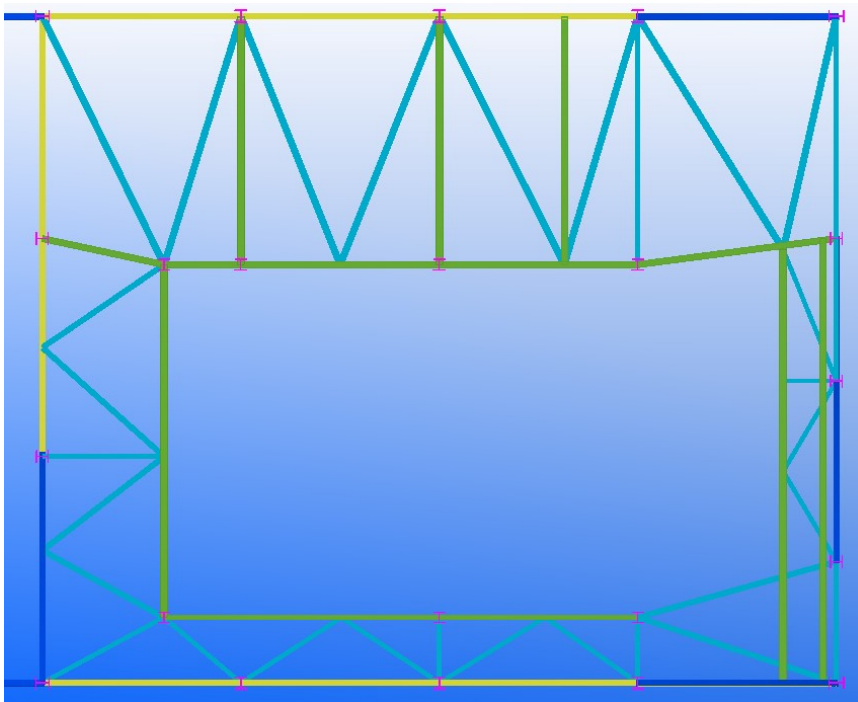
Teräslajit ovat yleensä S355 Euroopassa, Q345 Aasiassa ja C345 Venäjällä rakennettaessa. Teräslajin laatuluokkamerkintä on myös merkittävä (-J2H, +N, QL yms.) ja se on oltava jokaisen rakenneosan piirustuksessa merkittynä. Joissakin tapauksissa osassa rakenteista käytetään lujempaa esim. S460 terästä.

2.3.3 Jäykistysjärjestelmät

Kattilaitoksissa tavanomaiset jäykistysjärjestelmät ovat pysty- ja vaakasuuntaiset vinositeet. Pystysuuntaiset vinositeet voivat olla ulkoseinillä tai rungon sisällä, tyypiltään joko yksinkertaisia (Kuva 7B) tai kaksinkertaisia (Kuva 7A) jäykistysjärjestelmiä. Vaakasuuntaiset vinositeet (Kuva 8) siirtävät vaakakuormat seinille, joista pystysuuntaiset siteet vievät kuormat perustuksille. Pystysuuntaiset vinositeet sitovat kaikki tasot ja pilarit keskenään.



Kuva 7. Pystysuuntaiset jäykistysjärjestelmät teräsrakenteisessa kattilalaitosrakennuksessa. [10]



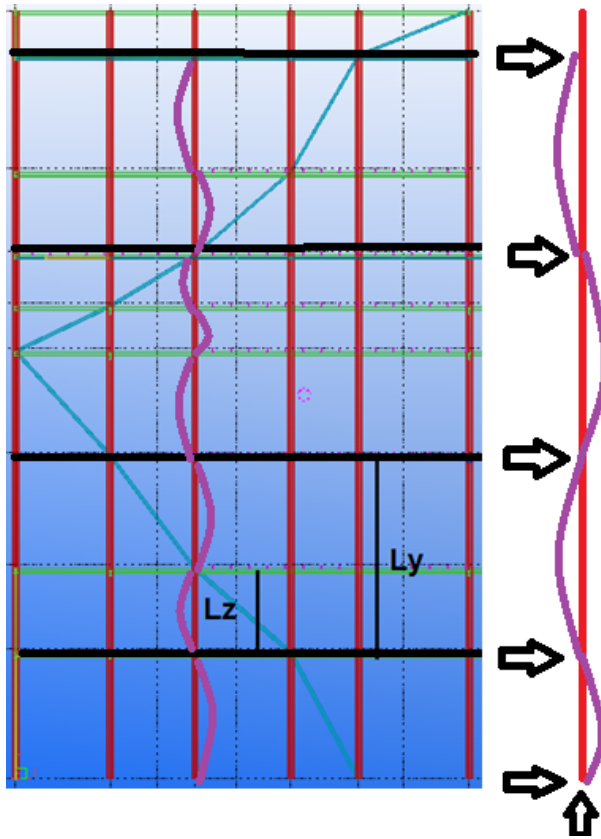
Kuva 8. Vaakasuuntainen jäykistysjärjestelmä kattilalaitosrakennuksessa. [10]

Vinositeiden nurjahduspituus on useasti määritelty projektin suunnitteluperusteissa. Pila-reiden, vinositeiden ja tasopalkkien nurjahduspituus määritellään kumpaankin suuntaan. Taulukko 2:ssa on esitetty esimerkki päätetyistä nurjahduspituuksista rakenneosille. En-

simmäisen kerroksen pilareiden kohdalla kertoimen 0,8 sijasta voi olla 1,0, jolloin rakenneosa ajatellaan nivelpäiseksi sauvaksi. Kerroin 0,8 vaatii perustusliitoksen olevan lähempänä momenttijäykkää liitosta. Kertoimella 0,8 pilarista tulee hiukan kevyempi ja näin ollen teräskiloissa laskettuna edullisempi rakenne. Sen sijaan se vaatii perustuksilta olevan täysin momenttijäykkää, mikä voi olla vaikeaa toteuttaa. Näin olleen kerroin 1,0 on kaikin puolin varmempi ratkaisu tässä kohtaa.

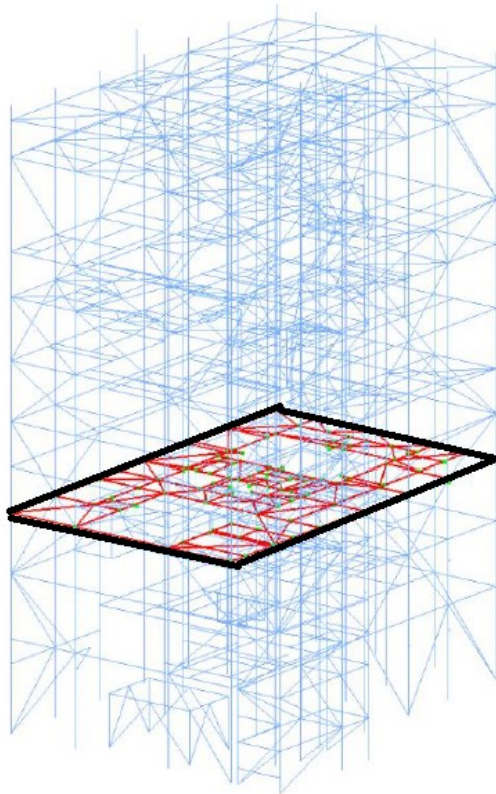
Taulukko 2. Tavanomaiset nurjahdus- ja kiepahduspituudet rakenneosille (kohdenumero M1) [10].

	Nurjahduspituus heikompi akseli	Nurjahduspituus vahvempi akseli	Kiepahduskestävyys
WI-pilarit 1.kerros	0,8*etäisyys perustuksilta ensimmäiselle tasojen etäisyys	jäykistävälle tasolle	
WI-pilarit	0,8*etäisyys perustuksilta ensimmäiselle tasojen etäisyys	jäykistävien tasojen välinen etäisyys	
WI-pilarit nurkat	0,8*etäisyys perustuksilta ensimmäiselle tasojen etäisyys	0,8*etäisyys perustuksilta ensimmäiselle tasojen etäisyys	
WB-pilarit 1. kerros	0,8*etäisyys perustuksilta ensimmäiselle jäykistävälle tasolle	0,8*etäisyys perustuksilta ensimmäiselle jäykistävälle tasolle	
WB-pilarit	0,8*etäisyys perustuksilta ensimmäiselle jäykistävien tasojen välinen etäisyys	0,8*etäisyys perustuksilta ensimmäiselle jäykistävien tasojen välinen etäisyys	
vinositeet	osan pituus	osan pituus	
tasopalkit	osan pituus, elleivät liittyvät osat pienennä nurjahduspituutta	osan pituus	osan pituus, elleivät liittyvät osat pienennä kiepahduspituutta



Kuva 9. Pilareiden nurjahduspituudet vahvempaan suuntaan L_z ja heikompaan suuntaan L_y (kohdenumero V1) [10].

Vaakasuuntaisen jäykistysjärjestelmän osat ovat pääsääntöisesti vinositeet, mutta myös tasopalkit. Nämä tasopalkit välittävät merkittäviäkin normaalivoimia ja sen lisäksi tasojen ja laitteiden pystykuormia. Sisäisen tietokannan yhtenä käsitteenä on jäykistysjärjestelmään kuuluvat seinäpalkit (Kuva 10).



Kuva 10. Teräsrungon jäykistysjärjestelmään kuuluvat seinäpalkit (kohdenumero K1) [10].

2.4 Detaljivaihe

2.4.1 Liitokset yleisesti

Liitosten täytyy vastata rungon mitoitukselle asetettuihin vaatimuksiin, jotka määrittää projektin lujuuslaskija. Eurokoodi 1993-1-8 luvun 5 mukaan riippuen rakennemallin kokonaistarkastelussa käytetystä menetelmästä ja liitosluokasta, liitosmalli voi olla nivelellinen, jäykkä tai osittain jäykkä. Kattilarakennuksen rungoissa pyritään nivelellisiin liitoksiin laskennan yksinkertaistamisen vuoksi.

Taulukko 3. Liitosmallin valinta EC 1993-1-8 mukaan[6].

Kokonaistarkaste- lussa käytetty menetelmä	Liitosluokka		
Kimmoteoria	Nimellisesti nivelellinen	Jäykkä	Osittain jäykkä
Jäykkä-plastinen malli	Nimellisesti nivelellinen	Täysin luja	Osittain luja
Kimmo-plastinen malli	Nimellisesti nivelellinen	Jäykkä ja täysin luja	Osittain jäykkä ja osittain luja Osittain jäykkä ja täysin luja Jäykkä ja osittain luja
Liitosmalli	Nivelellinen	Jäykkä	Osittain jäykkä

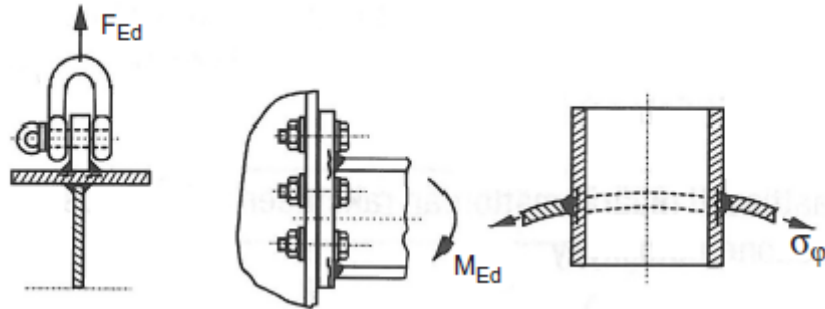
Laskennallisesti nivelelliset liitokset ovat leikkausvoiman ja normaalivoiman rasittamia. Leikkausvoiman rasittamat liitokset ruuvikiinnitysluokissa A, B ja C ovat joko reunapuristus- tai kitkaliitokset riippuen, millä tavoin voimat liitoksessa siirtyvät [8]. Vetovoiman rasittamat liitokset ovat ruuvikiinnitysluokaltaan D tai E (Taulukko 4). Liitosten kiinnittimet voivat olla joko ruuvit, nitit, niveltapit tai injektioruuvit. Ruuvit voivat olla joko esijännitettyjä tai jännittämättömiä [6].

Taulukko 4. Ruuvikiinnitysluokan määrittäminen EC 1993-1-8:n mukaan [6].

Luokka	Ehto	Huomautuksia
Leikkausvoiman rasittamat kiinnitykset		
A Reunapuristustyyppinen kiinnitys	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Esijännitystä ei vaadita. Kaikki lujuusluokat 4.6...10.9.
B Käyttörajoitilassa liukumisen kestävä kiinnitys	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Esijännitetyt lujuusluokkien 8.8 tai 10.9 ruuvit. Liukumiskestävyys käyttörajoitilassa, ks. 3.9.
C Murtorajatilassa liukumisen kestävä kiinnitys	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	Esijännitetyt lujuusluokkien 8.8 tai 10.9 ruuvit. Liukumiskestävyys murtorajatilassa, ks. 3.9. $N_{net,Rd}$ ks. 3.4.1(1)c).
Vetovoiman rasittamat kiinnitykset		
D Esijännittämätön ruuvi	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Esijännitystä ei vaadita. Kaikki lujuusluokat 4.6...10.9. $B_{p,Rd}$ ks. taulukko 3.4.
E Esijännitetty ruuvi	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Esijännitetyt lujuusluokkien 8.8 tai 10.9 ruuvit. $B_{p,Rd}$, ks. taulukko 3.4.
Vetovoiman mitoitusarvoon $F_{t,Ed}$ lasketaan mukaan vipuvaikutus, ks. 3.11. Ruuvit, joihin kohdistuu sekä leikkaus- että vetovoima tarkistetaan lisäksi taulukon 3.4 mukaiselle yhteisvaikutukselle.		

Lamellirepeilyn vaara täytyy osata tunnistaa liitoksia suunniteltaessa. Kuva 11:ssä esitetään esimerkkejä vedetyistä liitoksista, joissa lamellirepeily eli hitsauksen alaisen pinnan-suuntainen murtuminen saattaa tapahtua [7]. Lamellirepeily estetään joko käyttämällä ns. Z-levyjä tai vaatimalla hitsauksen jälkeistä tarkistusta, onko lamellirepeily tapahtunut. Jälkimmäisessä tapauksessa vaatimus ”NDT-tarkastus” kirjataan konepajakuviin ja pro-

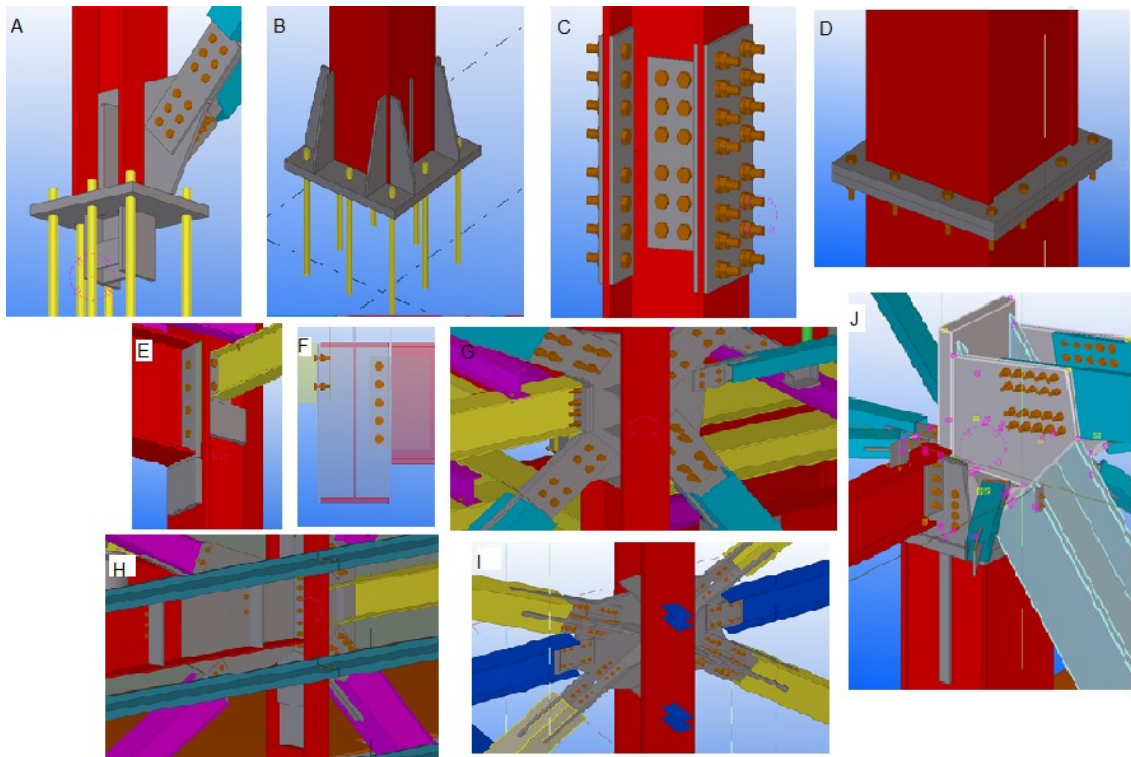
jektitietoihin. Z-levyt ovat paksuussuunnassa valmiiksi testattuja levyjä. Projekti- ja so-
pimuskohista on, kumpaa tapaa käytetään vai käytetäänkö vaihtoehtoisia liitoksia,
joissa lamellirepeilyvaaraa on pienempi tai olematon.



Kuva 11. Esimerkkejä lamellirepeilylle alttiista liitoksista [7].

2.4.2 Esimerkkejä liitoksista

Tässä luvussa käydään läpi, millaisia liitoksia on perinteisesti toteutettu kattilalaitospro-
jekteissa. Koska liitosten suunnitteluun ja mallinukseen kuuluu suurin osa suunnittelu-
ajasta, on tärkeä tunnistaa, mitä on aiemmissa projekteissa tehty ja miksi.



Kuva 12. Tavanomaiset liitokset kattilalaitosrakennuksissa (kohdenumerot B2, A2
ja D2) [10].

Perustusliitokset ovat yleensä jäykkiä. Kovasti rasitetuissa perustusliitoksissa pilarin poh-
jalevyyn hitsataan leikkauspala eli pala hitsattua tai valssattua I-profiilia leikkausvoimia

välittämään (Kuva 12A). Asennusaikana peruspulttien valun yhteydessä tapahtuu joskus epätarkkuuksia, jolloin levyjen reikiä joudutaan usein leventämään tai jopa vaihtamaan pilarin pohjalevy uuteen. Se vaatii selvityksiä, laskuja ja varmistuksia. Kattilapilarin profiili on usein hitsattu kotelo. Pohjalevyn mitoitus voi vaatii jäykistyslevyjä (Kuva 12 B).

Pilarijatkosten tyypillisiä liitostyyppejä ovat universaaliliitos (Kuva 12C), päätylevyliitos tai hitsattu liitos. Pilarijatkokset ovat jäykkiä ja täysin lujia liitoksia, jotka ovat myös aika usein alttiita asennusepätarkkuuksille. Pilareiden asennuksesta johtuva vinous tai epätarkkuus kostahtuu rakennuksen korkeammalle mentäessä, siten että pahimmassa tapauksessa palkit tai ristikot eivät sovi yhteen.

Universaalijatkoksessa uuman ja laippojen pultit on hyvä limittää helpottaen näin asennusmukavuutta. Pilarijatkoksissa siirtyvä pystykuormaa välittyy pilarin kosketuspintojen kautta ja konepajakuviin laitetaan ”*exact contact*” -merkintä, jolloin pinnat karhennetaan. Asennuksen valmistuttua pintojen välillä ei saisi olla rakoja.

Pilareiden päätylevyllisistä jatkosliitoksissa (Kuva 12D) päätylevyt ovat usein paksuja ja hitsien hitsattavuuden kannalta kotelopilarin profiileita joudutaan viistämään mahdollistaen kohtuullisten puoli-V hitsien toteuttaminen isojen pienahitsien sijaan.

Ylhäältä roikotettu kattila kiinnitetään kattilaristikoista tai kattilapalkeista, jotka liitetään järeisiin kattilapilareihin, jotka ovat usein kotelopilareita. Varmin liitostapa on viedä kattilakannattaja pilarin päätylevyn päälle (Kuva 12J) ja välittämällä sivuttaisvoimat ruuvi-kiinnityksin. Asennusaikaisen sivuttaisliikkeen varmistavat pilarin päätylevyn päälle hitsatun kynsipalat. Kokonaisvaltaisesti jäykkyyden rakenteelle varmistavat kattilakannattajan tason vinositeet.

Tavanomaisessa ei-maanjäristyskohteessa pilari-palkkiliitokset on helpointa toteuttaa tukilevyllisellä päätylevyliitoksella. Tukilevy hitsataan pilariin konepajalla ja se siirtää leikkauskuorman, kun taas vaakakuormia siirtävät työmaalla kiristettävät pultit. Asennuslevyt palkin ja pilarin väliin (1-2 kpl 5 mm shimmi-levyjä) mahdollistavat asennusvarmuuden (Kuva 12E).

Palkki-palkki liitoksissa yleisimmät ovat päätylevyliitokset ja leikkausliitokset. Leikkausliitokset voi toteuttaa joko poskilevy(i)llä tai liittyvän palkin uuma muotoilemalla. Kuva 12F:ssa keltainen palkki on päätylevyllä toteutettu ja punainen palkki yhdellä poskilevyllä. Perinteisesti on oletettu, että päätylevyliitos kykenee kiertymään vähemmän ja ottamaan hiukan enemmän epäkeskisyyssmomenttia, ja näin olleen jäykempi. Ripalevyliitos tai leikkausliitos on laskennallisesti lähempänä niveltä. Silti leikkausliitoksen suhteen täytyy olla varovainen, koska jos primääripalkin vääntöjäykkyys on suuri tai primääripalkin profiili on suuri verrattuna sekundääripalkkiin, liitoksen kiertymiskyky pitää tarkistaa [22].

Tässä esitetyt seinäsideliitosten kuvat (Kuva 12G -Kuva 12I) havainnollistavat, kuinka monin tavoin seinäsideliitossolmu on toteuttavissa. Siteeseen hitsattu liitoslevy voi olla yksi- tai kaksileikkeinen eli ns. hahloliitos. Useimmiten voimien olleessa seinäsiteissä suuria kuitenkin kaksileikkeinen. Samainen siteeseen hitsattu levy voi olla yksisuuntainen tai ristilevy. Irtolevyjien määrä ja leveys vaihtelevat tai niitä ei ole ollenkaan eli kaikki solmun varusteluosat ovat työpajalla hitsattu joko pilariin tai siteisiin. Solmun liittyvien palkkien liitokset voi toteuttaa joko päätylevyliitoksella, joka viedään pilarin uumaan kiinni (Kuva 12H) tai pilarin isoon liitoslevyyn (Kuva 12G).

3. TUTKIMUSAINEISTO

Tämän työn tutkimusmenetelmiksi valikoituivat sekä kvantitatiivinen (=määrällinen) että kvalitatiivinen (=laadullinen) tutkimusmenetelmä. Nämä kaksi täydentävät toisiansa ja tässä työssä näistä saadaan maksimaalinen hyöty.

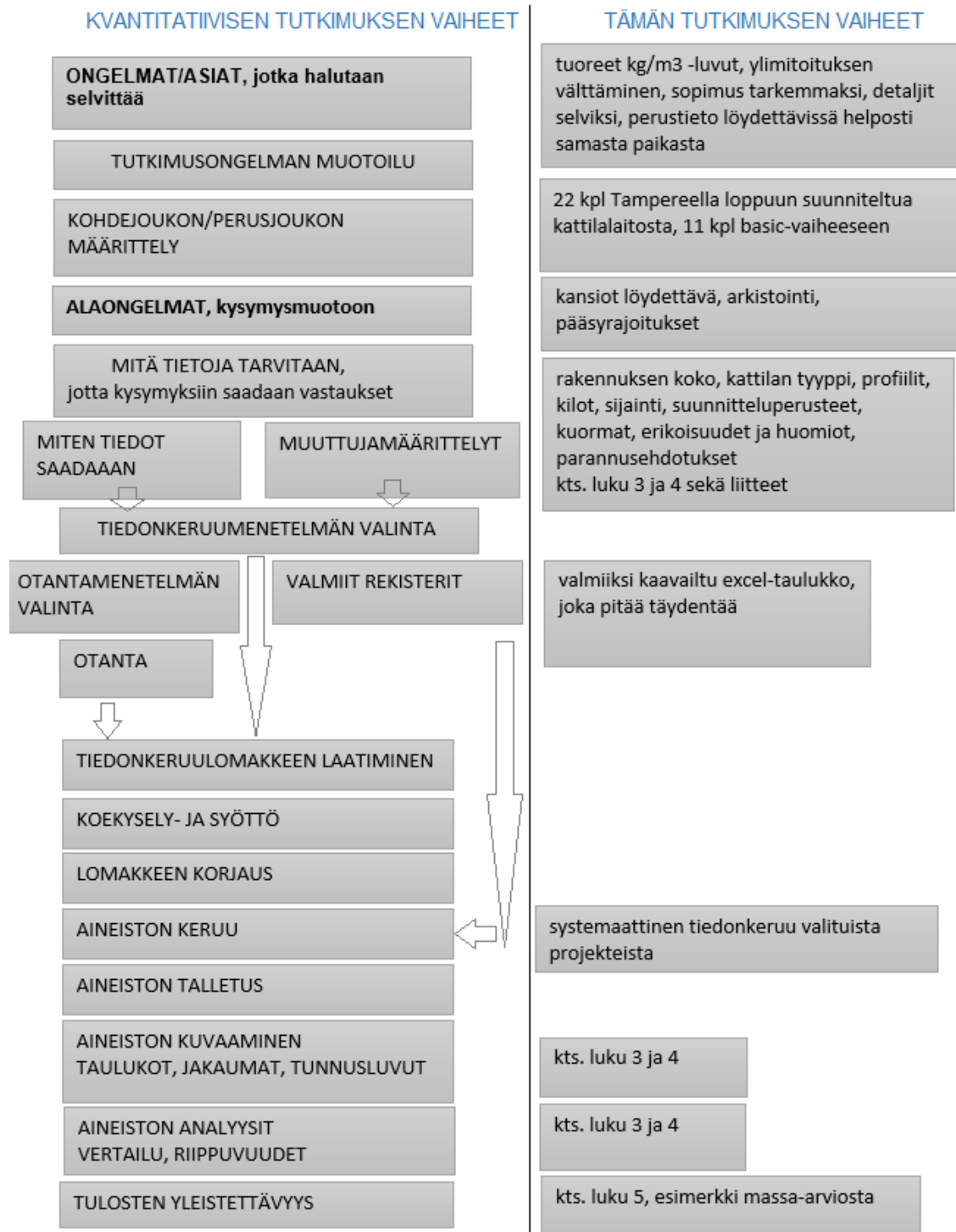
Kvantitatiivisessa tutkimuksessa pyritään analysoimaan kerättyjä tietoja tilastollisin analyysimenetelmin [14]. Tässä tapauksessa projektien data kerätään yhteen tietokantaan ja sen tiedoista pyritään löytämään yhtäläisyyksiä ja johtamaan riippuvuustekijöitä. Aiemmin huomatuista nyrkkisäännöistä pyritään joko todistamaan tai kumoamaan konkreettisin numeroin, esim. ”alta tuettu kattilalaitos on aina kevyempi”, ”maanjärjestyskohteen kattilalaitos on selkeästi painavampi”, ”pilareihin kuuluu eniten kiloja”, ”rakennuksen tilavuus on suoraan verrannollinen rakennuksen teräsmassaan”. Numeeriset tiedot esitellään tässä työssä taulukoina ja kaavioina sekä tietokannassa sellaisinaan. Ennakkokäsitysten paikansapitävyyttä pyritään todistamaan tilastollisin testeillä [12].

Kvalitatiivisessa tutkimuksessa ilmiötä halutaan ymmärtää syvällisemmin perustuen sanoihin ja lauseisiin [13]. Tässä tapauksessa metodina on asiantuntijahaastattelut, joissa pyritään selvittämään, mikä on ollut kunkin projektin erikoisuus, onnistumisen tai epäonnistumisen syy. Haastattelujen aikana tehdään muistiinpanoja esille tulleista asioista ja sen jälkeen haastattelun pöytäkirjat hyväksytetään haastateltavilla. Jo prosessin aikana analysoidaan, ovatko jotkut syyt vallalla, onko lähteitä jo tarpeeksi, milloin tärkeimmät ja ennalta sovitut projektit käsitelty.

Taulukko 5:ssä on kuvattu aiempien projektien yhteyttä tuleviin sekä tietokannan ja haastattelujen välistä riippuvuutta. Tietokantaa täyttämällä saadaan konkreettinen päätieto projekteista ja tutustutaan pääkohtiin, jolloin haastatteluissa keskustelu osataan johtaa tiettyyn aiheeseen ja toisaalta saadaan erikoishuomiot tietokantaan täytettäväksi. Eli sekä haastattelut että tietokanta ovat jo itsessään lähteet toisilleen.

Taulukko 5. *Toteutuneiden projektien yhteys tuleviin projekteihin tutkimuksen kautta.*

AIEMMAT PROJEKTIT		
lähteet:	TIETOKANTA	HAASTATTELUT
tutkimusmenetelmät:	KVANTITATIIVINEN	KVALITATIIVINEN
analyysi:	TILASTOLLINEN	vaihtelee
CASE STUDY tai TULEVA PROJEKTI		



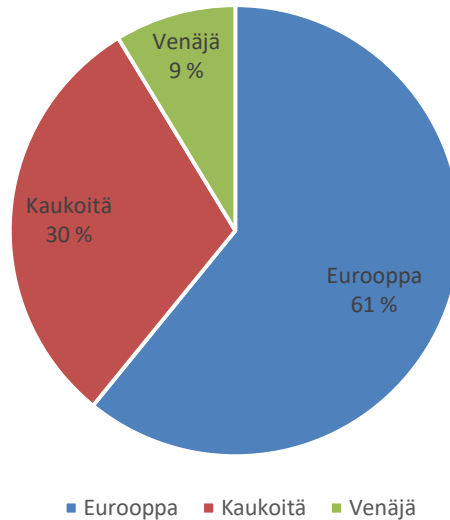
Kuva 13. Kvantitatiivisen tutkimuksen vaiheet sovellettuna (muokattu kaaviolähteestä [12]).

3.1 Projektikansioiden läpikäynti

Tiedon keruu toteutuneiden kattilalaitosten projektikansioista on kvantitatiivinen tutkimus eli määrällistä menetelmää käyttävä tutkimus. Tuloksena on numeerisia tietoja sisäl-

tävä aineisto, jota analysoidaan tilastollisin analyysimenetelmin. [11] Näiden menetelmien menestyksessä käyttö vaatii aihealueen sisältöön perehtyneisyyttä, tilastomenetelmien tunteudesta ja tietotekniikkataitoja. [12]

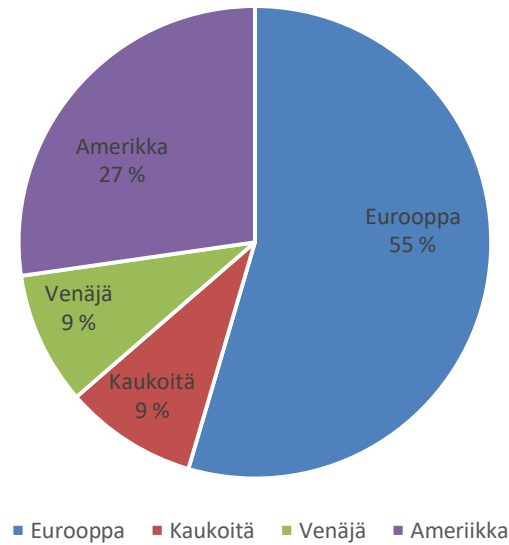
Loppuun suunniteltujen kattilalaitosrunkojen
sijainnit



Kuva 14. Loppuun suunniteltujen kattilalaitosprojektien sijainnit [10].

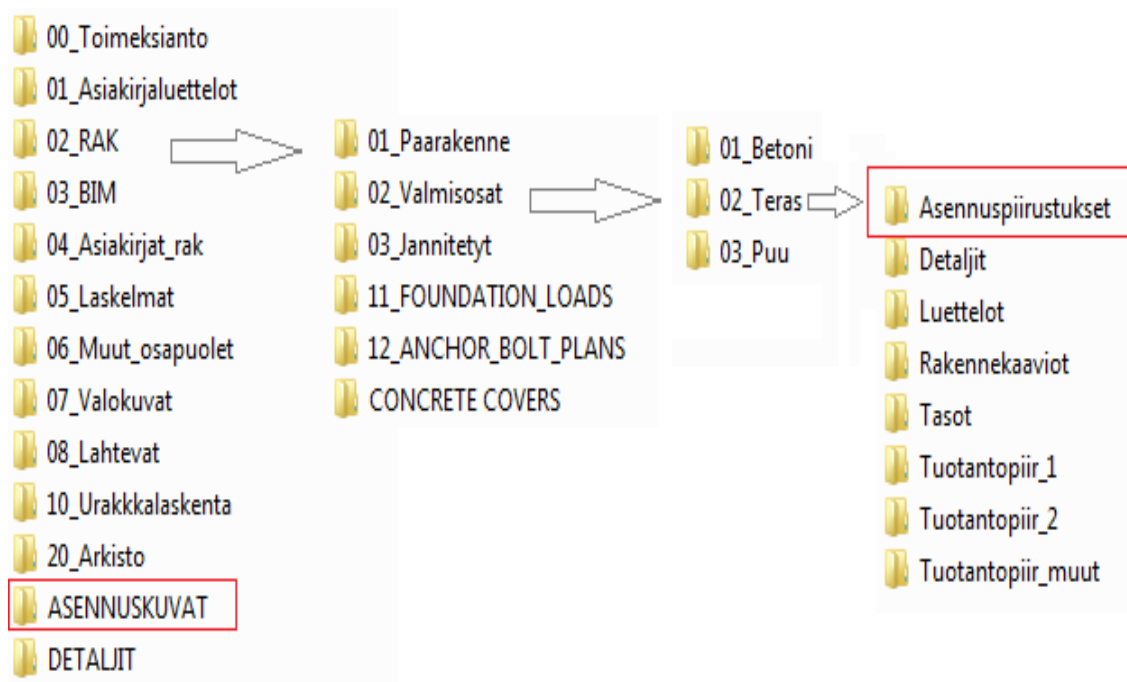
Tutkimuksen perusjoukon muodostavat 22 kpl loppuun suunniteltua kattilalaitosta. Lisäksi perehdyttiin yhteentoista esisuunniteltuun kattilalaitokseen, vaikka nämä eivät ole mukana teräslukuvertailuissa, mutta näiden projektien aikana tulleista erikoisuuksista on tullut opettavaisia seikkoja esille. Tutkimuksen muuttujat ovat kattilalaitosprojektien perustiedot, nämä on esitetty tarkemmin luvussa 4 ja liitteissä. Suurin osa loppuun suunnitelluista kattilalaitoksista oli suunniteltu Eurooppaan, 30% Kaukoidän maihin ja muutama Venäjälle (Kuva 14). Keskeneräisistä tarkastelluista projekteista oli niin ikään suurin osa Euroopassa ja toinen iso osa Pohjois- tai Etelä-Amerikassa.

Keskeneräisten kattilalaitosrunkojen sijainnit



Kuva 15. Basic- tai esisuunnitteluvaiheeseen jääneet kattilalaitosprojektien sijainnit [10].

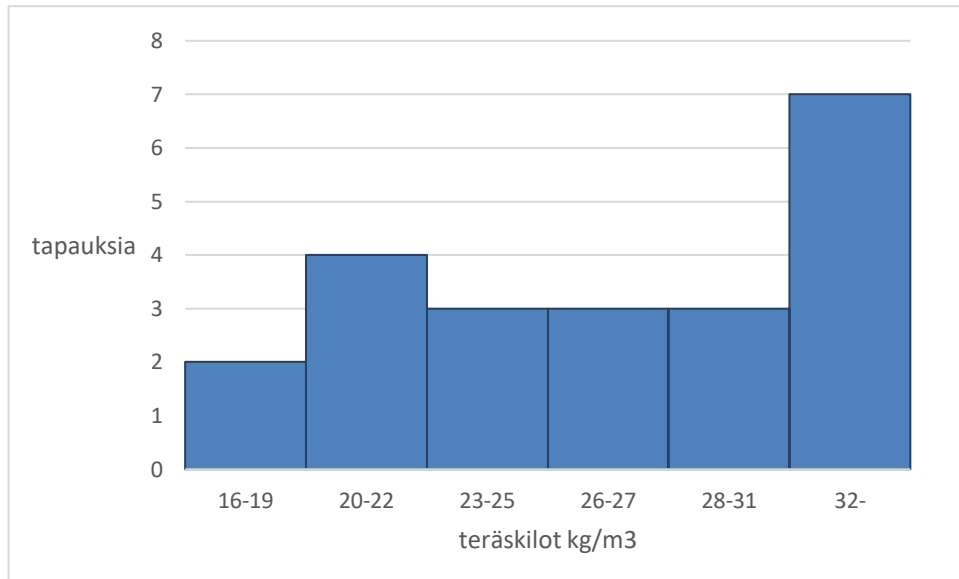
Suurimpana ongelmana projektikansioiden läpikäymisessä on ollut projektien paljous ja kansioiden sekavuus. Uusimpien projektien kohdalla on onneksi käytetty yhtenäistettyä kansiorunkoa, mutta kaikki alikansiot eivät välttämättä sisältäneet mitään tietoja. Projektikansioiden läpikäynti on näin ollen ollut aikaa vievää, eikä välttämättä tuottoisaa puuhaa. Kuva 16 havainnollistaa, kuinka viimeisimmät asennuspiirustukset saattoivat löytyä kansiorakenteiden alla monesta eri paikasta. Lisäksi yhtiön servereiden siirtymisestä paikasta toiseen on ollut vaikeus ylipäättään löytää projektin tuorein polku. Jos projekti on jo keretty arkistoidaan kirjoitussuojattuun kansioon, sen sisältämät tietomallit eivät edes avautuneet ilman mallin kopioimista omalle koneelle, mikä on myös aikaa vievää.



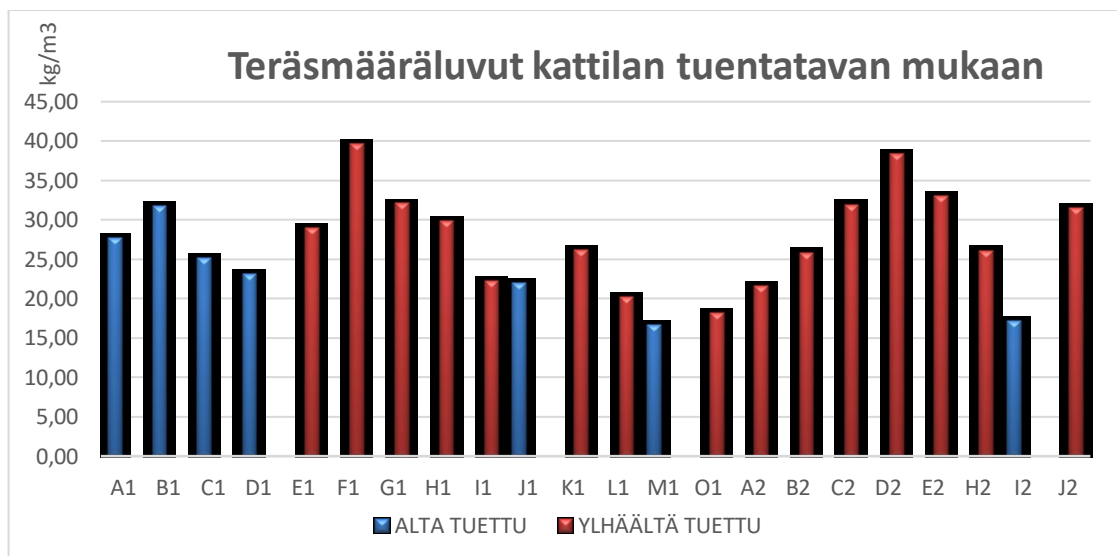
Kuva 16. Esimerkki tavanomaisesta kansiorakenteesta (kohdenumero D2, [10]).

Seuraavaksi kuvataan jotkut kansioista kerätyt tiedot tilastollisina tunnus- ja sijaintilukuina. Itse kattilalaitostietokanta toimii havaintomatriisin lähteenä. Se laaditaan vielä tiiviimpään muotoon tarvittaessa. Teräsmääräkilosta lasketaan keskiarvo, keskihajonta ja laaditaan frekvenssitaulukko ja -pylväsiagrammi: lähellä olevat arvot sijoitetaan samaan luokkaan ja katsotaan, mitä arvoa esiintyy eniten.

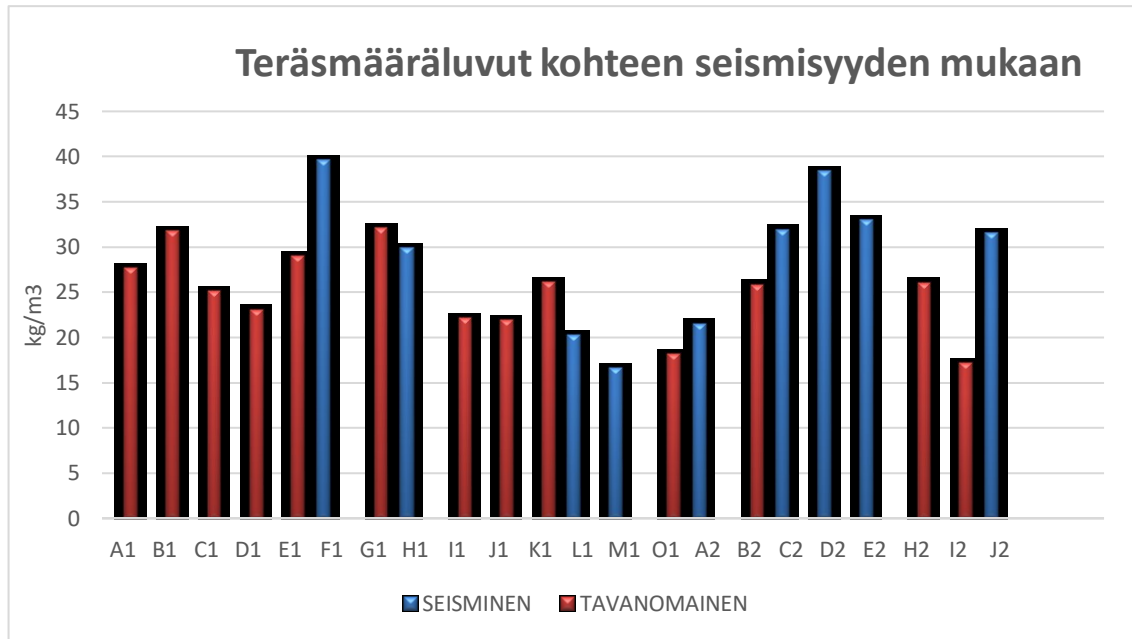
Kuva 17:sta havaitaan, että teräsmääräluvuissa hajonta on suurta käsitellyissä kattilalaitostapauksissa, mutta yli 32 kg/m^3 kattilarakennuksia on eniten. Alhaalta tuettu kattila johtaa kevyempään kattilarakennuksen rungon teräsmenekkiin kuin ripustettu kattila. 0 perusteella voidaan päätyä samaan johtopäätökseen, kun lasketaan alta tuetun ja ylhäältä tuetun kattilalaitoksen teräskilojen keskiarvot (Taulukko 9). Luvut ovat vastaavasti $23,33 \text{ kg/m}^3$ ja $28,36 \text{ kg/m}^3$ eli alhaalta tuetun kattilan kattilarakennuksen runko on keskimäärin kevyempi kuin roikotetun kattilan kattilarakennuksen runko. Kuva 19 havainnollistaa seismisten kohteiden teräsmääräluvut. Niissä hajonta selittyy sillä, että eri kohteissa maanjäristyksen voimakkuus ei ollut vakio ja suunnitteluperusteet olivat erilaisia.



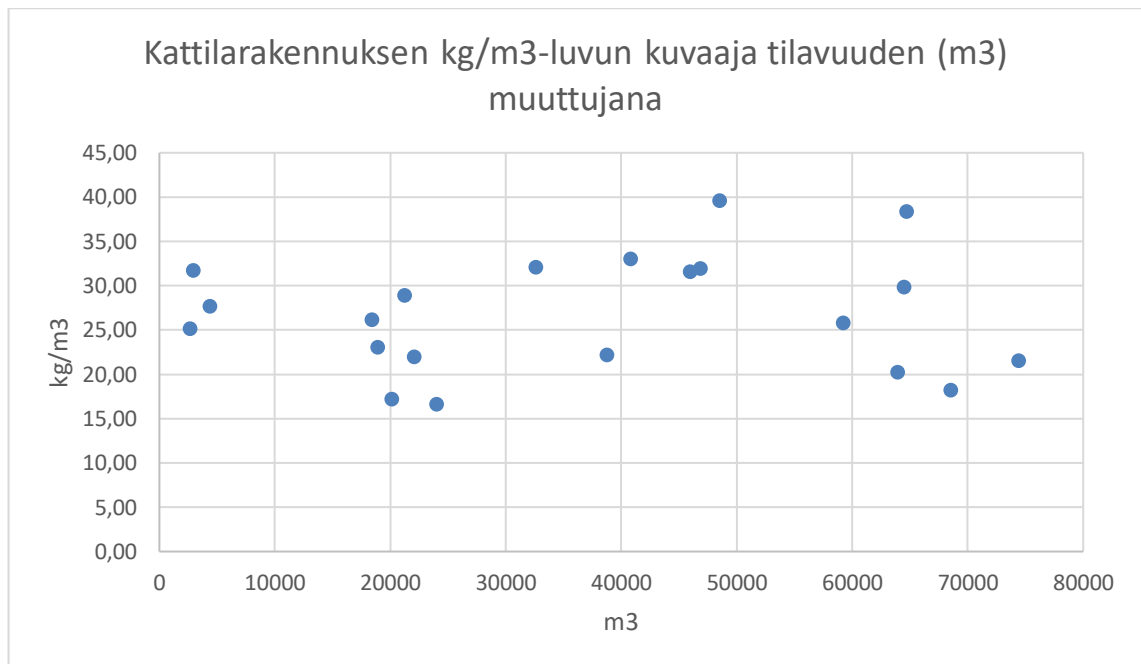
Kuva 17. Kattilalaitosten teräsmääräluvut käsitellyissä tapauksissa frekvenssinä [10].



Kuva 18. Teräsmääräluvut alta tuetuissa ja roikotetuissa kattilalaitoksissa [10]



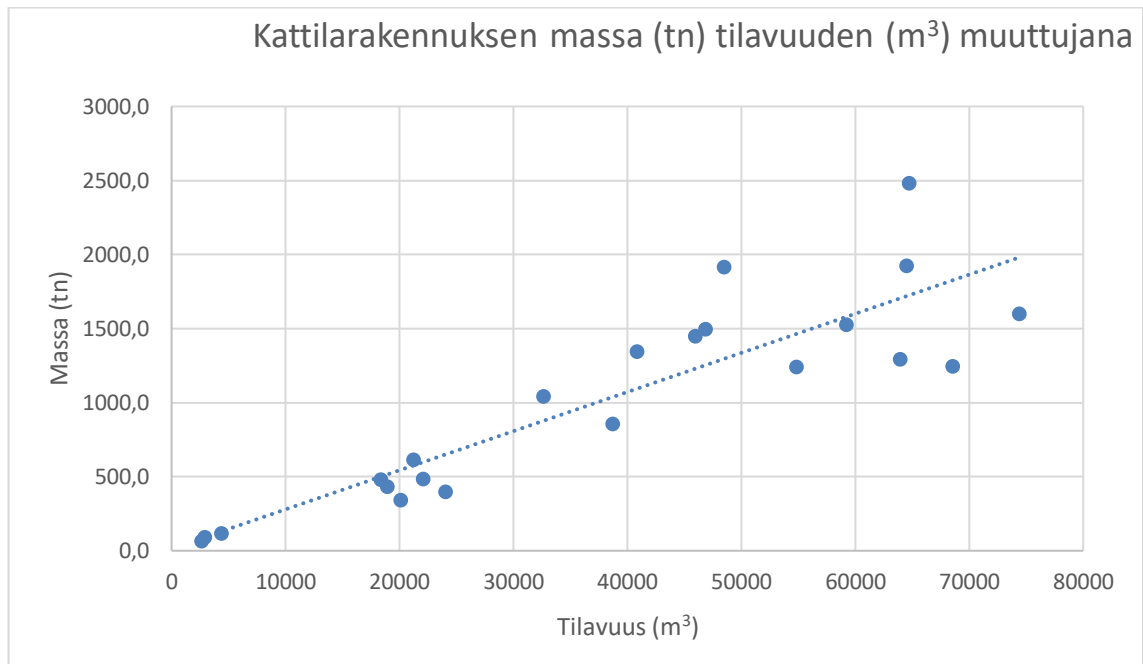
Kuva 19. Teräskilohuvut kohteen seismisyyden mukaan [10]



Kuva 20. Kattilarakennuksen tilavuuden ja kg/m³-luvun suhde kuvaajana [10].

Kuva 20:ssä esitetyllä kuvaajalla pyritään selvittämään, onko kattilarakennuksen tilavuudella ja teräsmääräluvulla (kg/m^3) jokin selkeä yhteys. Käsitellyistä 22 kappaleesta loppuun toteutuneista projekteista yksi tapauksista on jätetty kuvaajalta pois johtuen poikkeuksellisen suuresta tilavuudesta. Kuvaajan perusteella nähdään, että tilavuudeltaan pienet kattilalaitokset eivät ole välttämättä tiiviitä. Tilavuudeltaan 2 625 – 74 370 m³ kattilarakennusten teräsluku vaihtelee 16,64 – 39,58 kg/m³. Tosin selkeästi alle 30 000 m³ kattilarakennukset ovat olleet aina alle 33 kg/m³. Kuva 20:n suuri hajonta kertoo, että

teräsmääräluvun määräytymisessä on monta erilaista muuta muuttujaa mukana kuin pelkkä tilavuus. Selkeää regressiosuoraa ei tässä tapauksessa voida piirtää.



Kuva 21. Kattilarakennuksen massa (tn) tilavuuden (m³) muuttujana (m³) [10].

Kuva 21:n kuvavajan perusteella nähdään, että kattilarakennuksen tilavuuden kasvaessa myös teräksen kokonaismassa kasvaa suurin piirtein lineaarisesti, mikä on ymmärrettävää. Regressiosuora on piirretty excel-työkalulla, siinä regressiosuoran kertoimet a ja b laskettu pienimmän neliösumman menetelmänä [12].

Lineaarisen funktion kuvaaja on muotoa

$$f(x)=a+bx, \tag{1}$$

jossa

b on suoran kulmakerroin, joka voi olla mikä tahansa reaaliluku. x on selittävä muuttuja ja $y=f(x)$ on selitettävä muuttuja. Kulmakerroin b kuvaa suoran kaltevuutta ja se voidaan laskea y -koordinaatin muutoksen ja x -koordinaatin muutoksen suhteena. Vakio a on 0, koska suora leikkaa y -akselin origossa.

Taulukko 6. Regressiosuoran kulmakertoimen b laskenta.

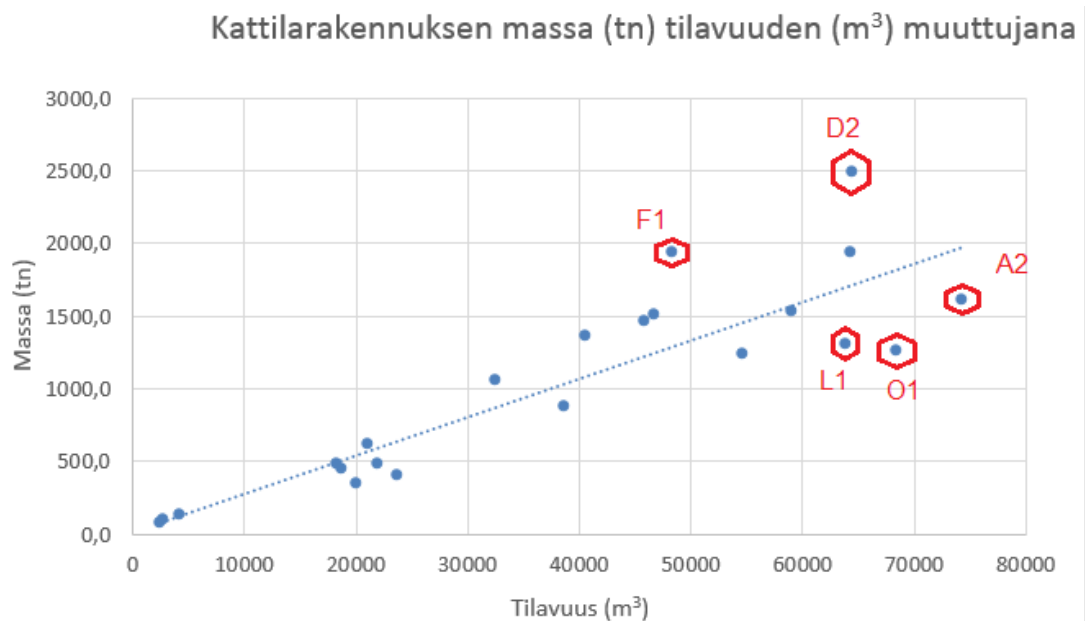
Regressiosuoralta arvoja:

x	y	b=y/x
10000	350	
20000	600	0,025
30000	800	0,02
40000	1100	0,03
50000	1300	0,02
60000	1600	0,03
b=		0,025

Kulmakerroin b on keskimäärin 0,025 eli regressiosuoran funktio on

$$y=0,025x,$$

jossa x on kattilarakennuksen tilavuus (m^3) ja y on kattilarakennuksen teräsmassa (tn).

**Kuva 22.** Regressiosuoran reilusti ulkopuolella olevat kohteet kattilalaitostietokanta koodeilla merkattuna. [10]

Kuten Kuvasta 22 nähdään, että osa kattilalaitoksista on trendisuoran ulkopuolella. Pohditaan, mitkä nämä kaukana kuvaajalta olevat kattilarakennukset olivat. F1 oli kattilalaitos kohteeseen, jossa on todella voimakas maanjäristys ja teräsrunko suunniteltiin dissiipoituvana, joka tarkoittaa sitä, että seinän vinositeet saavat nurjahtaa maanjäristyskuormien alla ja pilareiden on pysyttävä muuttumattomina. Runko oli todella jäykkä johtuen tuplasidonnasta seinälinjalla. D2 kattilalaitos on myös maanjäristyskohde ja isoa kilo-

määrää osaksi selittänee mukana olevien kaapelihyllyjen kilomäärät. L1 on keskivoimakkaan maanjärityksen kohde, mutta sovittiin mitoitettavaksi helpotetulla menettelyllä. O1 ns. tavanomainen ei-maanjäritys kohde, mutta erikoisen mallinen laitos. A2 on iso kattilalaitos, mitoitettuna ei-maanjärityskohteena ja eurooppalaisilla standardeilla.

3.2 Haastattelut

Tämän työn kvalitatiivinen tutkimus toteutettiin haastattelujen muodossa. Asiantuntija-haastatteluihin kutsuttiin firman lujuuslaskijoita, projektipäälliköitä ja osastopäälliköitä. Henkilöt valikoituivat, koska kyseiset henkilöt tietävät projekteista eniten. Yhteensä 15 henkilöä on osallistunut vapaamuotoiseen keskusteluun. Otanta katsotaan monipuoliseksi ja riittäväksi, koska kaikki halutut projektit saatiin käsiteltyä. Haastateltavia on pyydetty muistelevaan menneiden vuosien kattilalaitosprojekteja, joissa he ovat olleet avainasemissa. Tärkeimmät kysymykset olivat:

- Missä kattilalaitosprojektissa olet ollut mukana?
- Mitä projektissa meni hyvin tai huonosti?
- Oliko projektissa joitain erikoisuuksia?

Edellä luetut kysymykset esiteltiin jo haastattelukutsussa ja halutessaan haastateltavat saivat vapaasti aikaa valmistautua. Vastaus kutsuun oli kaikilta kutsutuilta myönteinen. Keskustelu eteni yleensä työhistorian mukaan eli projekteittain vanhemmista projekteista tuoreimpiin projekteihin. Välillä ajassa hypättiin taaksepäin vertailemaan jotain tiettyä yksityiskohtaa eri projektien välillä.

Lujuuslaskijoilta kysyttiin eniten päärunon mitoitukseen liittyvistä seikoista, projektipäälliköiltä projektin kulusta ja detaljisuunnittelusta. Osastopäälliköt osasivat kertoa myös tarjoustoiminnasta. Osa haastateltavista on ollut useassa asemassa työuransa aikana, heistä suurin osa on toiminut laskijan sekä osastopäällikön roolissa. Kuva 23:ssa on kaavio haastateltavien työnimikkeistä. Otanta on tasapuolinen, tosin laskijoita on eniten, ehkä siksi, että he ovat usein projektin varhaisemmista hetkistä mukana selvittämässä suunnitteluperusteita ja jatkossa myös projektin yhteyshenkilöinä.

Haastateltavien työnimike



Kuva 23. Haastateltavien otanta työnimikkeineen.

Haastattelija on valmistautunut jokaiseen haastatteluun perehtymällä tausta-aineistoon: projekteihin, joissa kukin asiantuntija on ollut mukana ja haastateltavat saivat vapaasti aikaa valmistautua muistelemalla toteutuneita projekteja. Pohjatöiden tekeminen ennen haastattelutilannetta auttoi kohdistamaan täsmälliset kysymykset juuri oikealle henkilölle liittyen johonkin yksityiskohtaan. Haastattelujen aikana esille tulleista seikoista on täytetty haastattelumuistio, joka on jälkeen päin hyväksytetty haastateltavilla.

Seuraavaksi esitellään haastatteluissa yleisimmin tulleet havainnot (Taulukko 7). Nämä havainnot ovat tulleet haastateltavilta vapaina kommentteina ilman kohdennettuja kysymyksiä. Täydellinen lista kommentteista löytyy Liitteestä B.

Taulukko 7. Haastatteluissa useimmiten esille tulleet kommentit [5].

Useimmiten haastatteluista tulleet esille ongelmat:	sama huomio useammalta:
paljon lähtötietomuutoksia	9
uusi suunnittelumaa on haaste	6
aikataulut ovat tiukkoja	5
haastava yhteistyökumppani (tilaaja/layout/konepaja tm)	4
sopimustilanteessa luvattu/sovittu mahdottomia tai kalliita ratkaisuja	4
avainhenkilön vaihto kesken projektin on ongelmallista	4
resurssipula yllätti (vaihtuvuus, sairastumiset yms.inhimillinen tekijä)	4

Haastateltavia yhteensä: 15 henkilöä
Esille tulleet erilaiset huomiot yhteensä: 23 kpl

Suurimmiksi ongelmiksi koettiin siis ulkopuolelta tulevat haasteet ja vaikeudet. Yleisesti haastateltavat ovat olleet tyytyväisiä tekniseen osaamiseen ja teknisiin työkaluihin, jotka ovat tarjolla, mutta niiden opetteluun käytettävissä oleva aika koettiin rajalliseksi. Suunnittelu on nykyaikana hyvin interaktiivista ja muutosten teko on entistä helpompaa, mikä johtaa helposti lumipalloefektiin, revisioiden määrä suunnitelmissa kasvaa kohtuuttomaksi. Jatkuvat muutokset saavat aikaan turhautumisen tunteen.

3.3 Tulokset

Monta kehitysideaa, projektien hyviä ja huonoja puolia saatiin kartoitettua projektikansioiden läpikäymisen ja haastattelujen myötä. Haastattelujen tuloksina voidaan todeta, että suurin osa työntekijöistä on ollut tyytyväisiä firman sisäiseen yhteistyöhön ja asiantuntijoiden tekniseen osaamiseen. Positiivista palautetta on tullut myös teknisistä työkaluista. Suurimmat haasteet koettiin johtuvan jatkuvista muutoksista, aikataulukäyristä ja tiedon huonosta kulkemisesta.

Aikataulut ovat lähes aina tiukkoja, mutta liian vapaa aikataulu ei ole myöskään hyvä, koska tällöin väliin tulee otettua liika muita töitä. Alkuperäinen projekti unohtuu tai muuttuu radikaalisesti alkuperäisestä. Yhtäkkiä huomataan, että aikataulut ovat jo myöhässä. Tarjousvaiheessa on vaikea ennustaa kaikkia mahdollisia muutoksia ja vastoinkäymisiä. Resurssipulat ovat aina yllätyksellisiä, sillä inhimillisiä tekijöitä (lomia ja sairastumisia) ei juurikaan oteta huomioon. Suunnittelu alkaa melko usein myöhässä puutteellisten lähtötietojen vuoksi. Uuden maan kohteeseen suunniteltaessa on aina varattavaa enemmän aikaa suunnitteluperustelujen selvittelyyn.

Muualle alihankintana laskettu lujuusmalli joudutaan useimmiten laskemaan uudestaan. Samoin kattilalaitoksen kopiolaitos ei tarkoita aina helpotuksia, vaan enemminkin suunnitteluhaasteita. Lujuuslaskijan vaihto kesken projektin on äärimmäisen huono vaihtoehto ja jos sen joudutaan tekemään, niin mieluummin vasta *basic*-vaiheen jälkeen. Jos projekti luovutetaan *basic*-vaiheen jälkeen detaljointiin muualle suunniteltavaksi, niin silloin joudutaan varmistamaan liitosratkaisujen kelpoisuus yhteen rungonlaskennan periaatteiden kanssa.

Liitoksia tehdään useasti tottumuksesta, kokemuksen ja hyviksi todettujen tapojen mukaan. Liitostyyppit on hyvä hyväksyttää asiakkaalla ja konepajalla mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, koska heillä voi olla oma näkemys asiaan. Lujuuslaskijan ja detaljointsuunnittelijan näkemys liitoksista täytyy olla yhtenevä. Myöhäisessä vaiheessa tehdyt periaatemuutokset teettävät eniten lisätöitä ja revisioita. Jos hyviksi todettuja liitostyyppiratkaisuja ei ole dokumentoitu missään ja ohjeistuksia ei ole laadittu, on vaikea tietää, kuinka edetä uudessa projektissa. Kustannuskysymys harvemmin huomioidaan liitosuunnittelussa kovin tarkasti, ellei kyseessä ole joku selkeä toistuva kokonaisuus ja tarjolla pari selkeää vaihtoehtoa.

Yleisesti haastatteluista on tullut ilmi palautetta, että kokeneista projektipäälliköistä on pulaa. Projektipäällikön merkitystä koko projektin onnistumisen kannalta ei osata arvoistaa tarpeeksi. Projektipäällikön niskoille kaatuvat sekä yleissuunnittelu, projektin viestintä asiakkaan suuntaan, työtehtävien delegointi ja tärkeimpien suunnitteluperiaatteiden kaavailu sekä isot päätökset. Tavoitteeksi onkin ehdotettu, että jokaisella projektipäälliköllä olisi nimitetty ”oikea apukäsi”, eli suunnittelija, joka olisi täysin perillä kaikista projektin asioista ja helpottaisi projektipäällikön taakkaa.

Toinen tärkeä esille tullut seikka oli se, että projektikiireet usein koetaan koituvaksi siitä, että projekti on tarjottu tiettyyn hintaan perustuen oletettuun teräsmäärään. Tietyn teräsmäärän ajatellaan vastaavan tiettyä tuntimäärää projektia kohti. Jos lopullinen teräsmäärä ei toteudu (esim. lähtötietojen myöhästymisen tai muuttumisen johdosta), se vaikuttaa asiakkaan tyytyväisyyteen ja projektin aikatauluun heikentävästi. Tämän takia olisi äärimmäisen kannattavaa kaikkien kannalta tarjota projektit ja arvioida tuleva teräsrakenteiden massa mahdollisimman tarkasti.

Usein uusi asiakas koetaan haastavaksi, koska käytäntöjen ja kemioiden yhteensovittamiseen menee omaa aikaansa ennen kuin yhteistyö alkaa sujua. On todettu, että lisätyöt pitää pystyä tunnistamaan ajoissa, koska se on projektin kannalta paras ratkaisu. Lisätöiden saamisella pystytään paremmin reagoimaan resursseilla ja aikatauluihin voi saada helpotusta. Ei tehdä kiireessä äkillisiä ja kalliita suunnittelupäätöksiä. Ei ole kenenkään osapuolen etu, että suunnittelun jälki on keinoa aikataulusyistä. Sopimukseen pitäisi perehdyttää kaikki projektissa työskentelevät suunnittelijat ja sopimukseen kannattaa palata ajan saatossa, jos ehdot muuttuvat tai lisätöitä tulee paljon. Näin vältetään vaarallisilta olettamuksilta. *Design criteria* -tiedosto ehdotetaan hyväksyttäväksi asiakkaalla projektin varhaisessa vaiheessa.

4. KEHITYSKOHDAT

4.1 Kattilalaitosten tietokanta

Kattilalaitosten tietokanta on toteutettu firman sisäiseen käyttöön. Se sisältää yksityiskohtaisia tietoja toteutuneista projekteista. Kattilalaitosprojekteja on kerätty Tampereen toimistossa suunnitelluista kohteista: 22 kpl lopulliseen detaljivaiheeseen päässeitä projekteja ja 11 kpl *basic*-vaiheeseen jääneitä projekteja. Alun perin tietokannan runko oli alettu toteuttaa kesätyöntekijän toimesta ja tämän työn tekijä on muuttanut vain joitain tietokannan pystysarakkeita sekä täyttänyt tietokantaa eteenpäin. Kesätyöntekijän toimesta oli kerätty noin 10 kattilalaitoksen tiedot.

Tietokanta on *excel*-pohja, johon on kerätty projekteittain muun muassa seuraavanlaisia tietoja: suunnittelumaa, projektin avainhenkilöt, kattilatyyppejä, erikoisuudet kohteessa, laskentaraaportit, kattilarakennuksen teräsmääräluku (kg/m^3), kuormat, kuormien resulantit, kuvat jäykistysjärjestelmistä ja taipumarajat. Tiedot eivät ole julkisia, mutta tässä diplomityön liitteessä C on luettelo siitä, mitä tietoja on kerätty. Firman sisäiseen käyttöön on tehty ohjekortti kattilalaitosten tietokannan täyttämistä jatkoa varten. Aina kun projekti on saatu loppuun, samantyyppisiä tietoja kerätään jatkokäyttöä varten.

Seuraavaksi esitellään joitakin tunnuslukuomaisia tietoja, jotka saadaan kerättyä tietokannan tiedoista. Toteutetun sisäisen tietokannan tiedoista saatiin ajettua keskimääräinen teräskilojen jakauma kattilalaitoksessa ilmoitettuna prosentteina suhteessa koko rungon massaun (Taulukko 8 ja Liite A). Tässä aineistossa oli mukana 18 kpl loppuun asti toteutettua kattilalaitosta. Ajatuksena oli havainnollistaa, mitkä rungon osat ovat massaltaan merkityksellisimpiä. Seinäpilarit, tavallisen pituiset primääripalkit sekä kattilapilarit olivat teräsmassojen osalta kärjessä.

Johtopäätös on luonnollisesti se, että jos teräskiloissa halutaan säästää, tarkempi mitoitustapa näiden osien kannalta on kannattavaa. Juuri näiden osien kohdalla käyttöasteisiin tuijottaminen on perusteltua. Tärkeänä seikkana on kuitenkin huomioitava, että Robot Analysis -ohjelman tuloksista ajettut murtorajatilan käyttöasteet eivät kerro koko totuutta rakenneosan mitoituksista. Usein taipuma eli käyttörajaatila pitkillä palkeilla tai siirtymähoikilla rungoilla tulee määrääväksi, jolloin murtorajatilan käyttöaste jää matalaksi. Samoin käy, jos erilaisten profiileiden määrä halutaan rajoittaa.

Taulukko 8. Teräskilojen jakauma kattilalaitoksen teräsrungossa, osan massan suhde ilmoitettuna prosentteina suhteessa koko rungon massaan [10].

Keskimääräinen teräskilojen jakauma kattilalaitoksessa rakenneosien välillä.

Osuus ilmoitettu %:na koko laitoksen massasta

Seinäpilarit	13,6
Tavalliset primääripalkit	12,6
Kattilapilarit	12,1
Sekundääripalkit	9,2
Pitkät (yli 6 m) primääripalkit	9,0
Kattilapalkit	6,2
Muut keskipilarit kuin kattilapilarit	6,1
Seinäsiteet	3,2
Muita isoja laitteita tukevat palkit	3,2
Tasositeet	2,3
Jäykistysjärjestelmään kuuluvat palkit	1,8
Muut primäärirungon osat	1,2

Taulukko 9. Teräsmääräluvut (kg/m^3) kattilan tuentatavan mukaan [10].

Teräskilot kattilan tuentatavan mukaan:

Alta tuettu:	Ylhäältä tuettu:
27,66	28,92
31,68	39,58
25,11	32,06
23,07	29,86
21,94	22,18
16,64	26,15
17,19	20,24
	18,20
	21,51
	25,81
	31,95
	38,39
	32,98
	26,05
	31,56
Keskiarvo:	23,33
	28,36

Taulukko 10. Teräsmääräluvut (kg/m^3) kohteen seismisyyden mukaan [10].

Teräskilot kohteen seismisyyden mukaan:			
Seisminen kohde:		Tavanomainen kohde:	
	39,58		27,66
	29,86		31,68
	20,24		25,11
	16,64		23,07
	21,51		28,92
	31,95		32,06
	38,39		22,18
	32,98		21,94
	23,91		26,15
			18,20
			25,81
			26,05
			17,19
Keskiarvo	28,34 kg/m^3		25,71 kg/m^3

Seismisellä alueella rakennetut teräsrungot ovat olleet keskimäärin $2,63\text{kg/m}^3$ painavampia kuin tavanomaisiin olosuhteisiin rakennetut kattilalaitosrungot (Taulukko 10).

Tietokannasta laskettiin joidenkin laitosten varustelulevyjen osuuden koko kattilarakennuksen massasta. Keskimäärin varustelujen osuus on ollut 10,4% (Taulukko 11). Tavanomaisissa kohteissa 10% tai vähän alle ja seismisissä kohteissa 10-17,7% välille. Keskiarvon laskennasta on jätetty pois erittäin raskaan maanjäristyskohteen luku (42,4%) kyseessä olleessa hyvin epätavanomainen kohde.

Taulukko 11. Varustelulevyjen osuus koko kattilarakennuksen massasta. [10].

kohde	varustelut YHTENSÄ	rungon massa	varustelujen osuus
	tn		%
A1	9,5	120	7,9
B1	8,3	92	9,0
E1	83,2	614	13,6
F1	809,4	1919	42,2
G1	99,4	1045	9,5
I1	79,7	858	9,3
J1	43,0	484	8,9
K1	51,9	480	10,8
L1	170,3	1293	13,2
M1	70,5	399	17,7
N1	71,4	1541	4,6
Varustelujen osuus keskimäärin (%):			10,4

Seuraavaksi vertailtiin varusteluosien tyyppien osuutta kattilarakennuksen koko rungon massasta (Taulukko 13) ja kaikkien varustelujen massasta (Taulukko 12). Varusteluosia ovat kaikki irto-osat, jotka kiinnitetään pääprofiliin konepajalla hitsaamalla tai konepajaruuvein. Eniten teräskiloja varusteluissa kuuluu pilarien liitososiin ja seuraavaksi eniten primääripalkkien varusteluihin. Pilareiden liitososat ovat suurimmaksi osaksi seinäside-liitoksia, palkkiliitoksia ja pilareiden pohjalevyjä. Muut liitos- ja varusteluosat käsittävät mm. kattilapalkkien liitoslevyjä, pilareiden jatkoslevyjä yms. irto-osia. Varusteluosien massan osuus kaikkien varustelujen massasta [10].

Taulukko 12. Varustelujen osuus kaikkien varustelujen massasta. [10].

Varustelujen osuus kaikkien varustelujen massasta

Kohde	Pilarien pohjalevyt %	Peruspultit %	Pilarijatkokset %	Pilarien liitososat yhteensä %	Siteiden liitososat %	Primääripalkkien liitokset %	Sekundääripalkkien liitokset %	Muut liitos- ja varusteluosat %
A1	10,8	2,4	5,1	18,3	16,3	24,9	5,0	17,3
B1	13,7	3,7	0,0	17,5	5,8	28,9	6,2	24,2
E1	5,4	2,3	10,1	18,4	19,2	23,8	3,3	17,6
F1	15,8	10,6	1,6	30,4	21,0	8,2	4,9	7,4
G1	7,7	2,5	9,3	19,5	14,7	0,0	0,0	46,3
I1	5,8	2,3	13,3	22,0	15,7	26,7	2,4	11,8
J1	6,0	1,9	8,9	16,8	8,5	9,7	0,0	48,3
K1	7,0	3,2	6,4	26,5	19,4	9,3	3,6	24,5
L1	6,2	2,1	8,7	18,8	15,4	6,4	1,4	41,0
M1	9,9	4,3	1,8	16,0	8,8	11,2	4,3	43,7

Taulukko 13. Varusteluosien massan osuus koko rungon massasta [10].

Varustelujen osuus koko rungon massasta

Kohde	Pilarien pohjalevyt %	Peruspultit %	Pilarijatkokset %	Pilarien liitososat yhteensä %	Siteiden liitososat %	Primääripalkkien liitokset %	Sekundääripalkkien liitokset %	Muut liitos- ja varusteluosat %
A1	0,86	0,19	0,40	1,45	1,29	1,97	0,39	1,37
B1	1,23	0,34	0,00	1,57	0,52	2,59	0,55	2,18
E1	0,73	0,31	1,37	2,49	2,60	3,22	0,45	2,39
F1	6,66	4,46	0,67	12,85	8,87	3,46	2,08	3,13
G1	0,74	0,23	0,88	1,85	1,40	0,00	0,00	4,41
I1	0,53	0,22	1,23	2,04	1,46	2,48	0,22	1,09
J1	0,53	0,17	0,79	1,49	0,76	0,86	0,00	4,29
K1	0,76	0,35	0,69	2,86	2,10	1,01	0,39	2,65
L1	0,81	0,28	1,15	2,48	2,02	0,84	0,18	5,40
M1	1,74	0,76	0,32	2,82	1,56	1,97	0,76	7,71

4.2 Suunnitteluvirheiden ja ylityönsä välttäminen

Tämän tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli ollut suunnitteluvirheiden tunnistaminen ja niiden välttäminen tulevaisuudessa. Alussa virheen tekijä ei ole tietenkään tietoinen virhe-

tään ja kun virhe tulee ilmi, ensimmäisenä ruvetaan korjaamaan virhettä ja pyritään minimoimaan siitä koituvaa haittaa. Sisäiseen tietokantaan on kerätty huomiot suurimmista virheistä, jotta niistä voidaan oppia tulevaisuutta varten. Sisäisessä ohjekortissa työntekijöitä rohkaistaan kertomaan virheistään avoimesti työkavereilleen ja lisäämään tietoisuutta. Virheenä tässä yhteydessä pidetään myös suunnitteluratkaisua, joka on ajan saatossa osoittautunut huonoksi tai kustannustehottomaksi.

Rakenneosien ylityksen välttämiseksi on tärkeä tietää jo projektin alkuvaiheessa, mikä on rakenneosien sallittu käyttöaste, johon mitoituksessa pyritään. Esimerkiksi pilareille se voisi olla 95%. Pilarit ovat muutenkin kattilalaitosprojekteissa teräskilomäärältään painavin rakenneosa (Taulukko 8). Rakenneosien mitoituksessa joissakin tapauksissa määräävät käyttörajoituksen ylitys (taipumat, väsyminen, värähtely) ennen murtorajatuksen ylitystä. Ehdotuksena ylityksen välttämiseksi on käyttöasteen haarukan sopiminen tilaajan ja suunnittelijan välillä projektin varhaisessa vaiheessa. Asia koskee sekä rakenneosia että liitosten mitoituksen käyttöastetta.

Ongelmana nousee esiin seikka, että suunnittelu usein aloitetaan puutteellisilla lähtötiedoilla ja mitoitetaan joitakin osia varmaan päälle, koska lisäkuormia ilmestyy lähes poikkeuksetta projektin edistyessä. Joskus projektikiireissä käyttöasteissa jää ns. ilmaa tulevia muutoksia varten. Systemaattisena virheenä tämä johtaa todella painavaan kg/m^3 -lukuun [5]. Profiilien kovasta optimoinnista taas kumpuaa ongelmia detaljivaiheessa, jolloin yksikertainen liitos ei mahdu geometrian kannalta esim. liian matalaan I-profiilin laippojen väliin. Mallinnusohjelmien automaattisia liitosten suunnittelutyökaluja on mahdoton käyttää erikoisiin profiileihin.

4.3 Projektijohdolliset seikat

Projektin johtaminen vaatii monien seikkojen rinnalla ajan käytön seurantaa. Projektin lopussa kannattaa tehdä yhteenveto, miten projekti on mennyt ajallisesti. Osasta tietokantaan kerätyistä projekteista saatiin jälkeen päin tuntimäärät, jotka on käytetty kyseisen kattilarakennuksen suunnitteluun. Kattilarakennuksen teräsrungon kokonaismassa jakamalla tällä tuntimäärällä saadaan ”tehokkuusluku” kg/h eli tieto, kuinka monta kiloa terästä pystytään suunnittelemaan työtunnissa. Nämä tiedot eivät ole tässä työssä julkisia.

4.4 Hyviksi todetut liitosratkaisut

Terärakenteisissa kattilalaitosrungoissa jäykistysjärjestelmä on äärimmäisen tärkeä. Kuten aiemmin luvussa 2 on todettu, tärkeimmät jäykistysjärjestelmän osat ovat rungon poikittaiset vaakasuuntaiset ja ulkoseinissä kulkevat pystysuuntaiset vinositeet. Niiden merkitys koko rakennuksen stabiilisuuteen on suuri. Rakennemallissa liitokset näiden rakenneosien välissä ovat oletuksena niveliä. Seinäsideliitossolmuja on melkein joka laitoksessa ja niiden määrä on suuri. Taulukko 12:ssa on todettu, että pilareiden liitoksiin kuuluu teräskiloiltaan eniten varusteluosia. Pilareiden varustelulevyt ovat suurimmaksi

osaksi jäykistysjärjestelmien liitoslevyt ja palkkien levyt. Kerran valittu liitoksen toteutustapa vaikuttaa pitkälle projektin loppuun.

Tämän työn alussa tehdyissä haastatteluissa kävi ilmi, että liitostyyppit päätetään projektin varhaisessa vaiheessa, mutta harvoin projekteissa on resursseja ottaa liitosvaihtoehtojen kustannuskysymys huomioon. Tässä ehdotetaan, että jatkossa kustannuskysymykseen liitosvalintojen osalta panostettaisiin enemmän. Kun liitosten määrä (kuten seinäsideliitossolmujen) kasvaa vaikka tuplaten, kustannuskysymys ja kannattavuuskysymys on otettava huomioon erittäin herkästi.

Seinäsideliitokset ovat oletuksena nimellisesti niveliä. On tärkeää, että detaljisuunnittelija osaa mallintaa ne tarkoituksenmukaisina. Mitä tapahtuu rakennemallille, jos liitokset ovat niin jäykkiä, että rakenteellinen nivelkohta siirtyy liitoksen heikompaan kohtaan eli poskilevyjen väliin ja pilarista poispäin. Teoreettinen nurjahduspituus siteelle on tällöin lyhyempi. Jos sideliitokset oli tarkoitus mitoittaa nurjahduskapasiteetille, liitoksen mitoitettava kuorma on tällöin paljon isompi. Onko seinäsideliitos, jossa on 20 kpl pultteja, edelleen nivelellinen? Maanjäristyskohteessa liitoksen sitkeys on lisäksi ensiarvoisen tärkeä, mutta myös tavanomaisissa ei-seismisissä kohteissa hauraasti murtuvia liitoksia tulisi välttää.

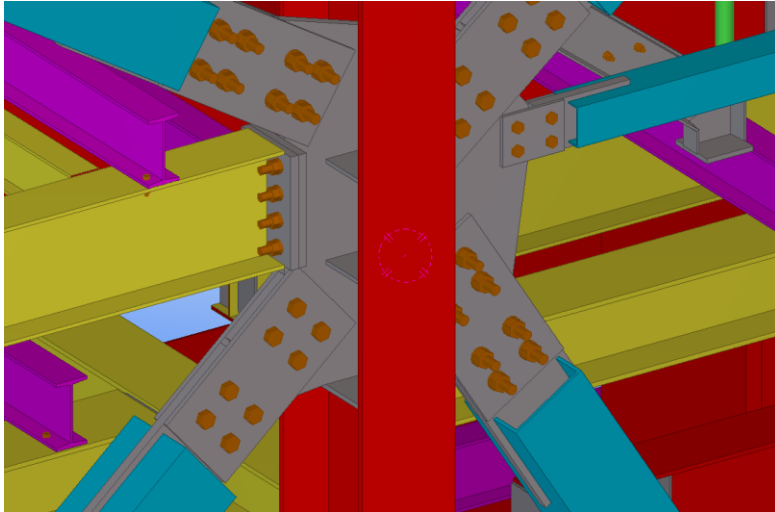
Todellisuudessa siteiden liitosta on vaikeaa saada täysin jäykäksi edes tarkoituksella. Se vaatisi hyvin monta pulttia ja jäykistyslevyä. Todellisuudessa liitokset ovat nivel ja jäykän liitoksen välimaastoa, mutta lähempänä niveltä, laskennan yksinkertaistamisen vuoksi. Toinen huomioitava asia on, kuinka hyvin pilari pystyy ottamaan tukimomenttia, jos se sinne oletetaan välittyvän. Pilarin mitoituksessa se tuskin on otettu huomioon. Sen takia on ensiarvoisen tärkeää, että liitokset ovat tarkoituksenmukaisesti niveliä niissä paikoissa, joissa ne on oletettu sellaiseksi rakennemallia laskettaessa.

Valinta siitä, tuleeko palkin ja pilarin väliin päätylevy- vai leikkausliitos johtuu maakohteisista ja tilaajan vaatimuksista. Maanjäristyskohteessa pyritään välttämään vedettyjä pulttikiinnityksiä, koska ne voivat murtua hauraasti ilman silminnähtävää myötäämistä. Seismistä kuormaa voidaan ajatella toistuvaksi vetokuormaksi. Vedettyjä ruuveja voisi käyttää maanjäristyskohteessa, jos ne ovat esijännitetyjä (kiinnitysluokka E) lujuusluokan 8.8 tai 10.9 ruuveja [8], mutta niiden saaminen voi olla kallista ja hankalaa. Näin ollen maanjäristyskohteessa kaikki variaatiot leikkausliitoksista ovat tervetulleita. Jos kyseeseen tulee kuitenkin päätylevyliitos, on huomioitava mahdolliset vipuvoimat sekä lamellirepeilyn vaara ja levyn olleessa tarpeeksi paksu on tarkistettava, täytyykö teräksen materiaalin olla Z-teräs. Lamellirepeilyn estämisen keinot on käsitelty aiemmin lyhyesti (kts. Luku2).

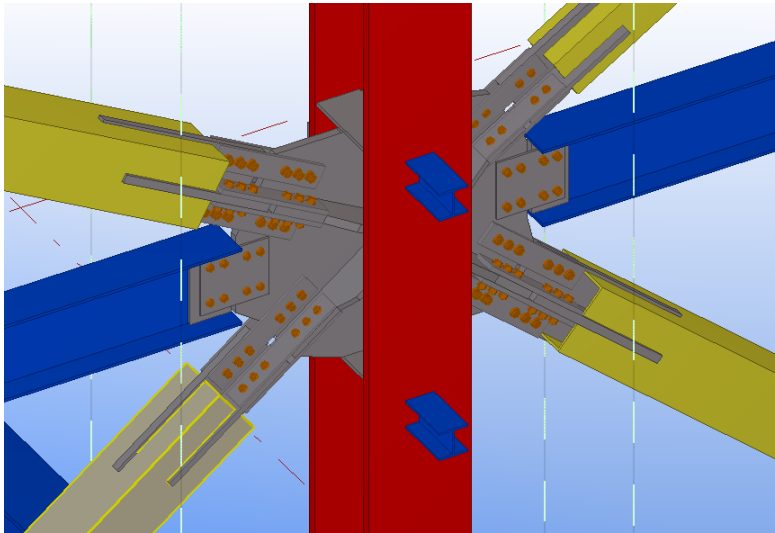
Lähtökohtaisesti epäkeskeisyys rakenneosien referenssilinjoihin nähden ei ole suotavaa. Käytännössä se on joskus sallittava, ettei liitos kasvaisi joka suuntaan liian suureksi. Li-

tosten epäkeskeisyydet on aina otettava huomioon pilarin mitoituksessa, koska se vaikuttaa eniten pilarin uuman kestävyYTEEN. SFS-EN 1993-1-1 luvussa 5.3 velvoittaa ottamaan epäkeskeisyydet huomioon rakennelaskennassa. Joskus pilarin uuman kestävyyttä ja liitosbumerangia joudutaan vahvistamaan vahvistelevyillä. Rakennemallin laskennan jälkeen mallinnetut epäkeskeisyydet johtavat laskennan iterointikierrokseen tai ylimääräisiin tarkastuksiin.

Seuraavaksi esitellään kahta sideliitoksen solmuvaihtoehtoa (Kuva 24 ja Kuva 25), joista huomataan, ettei detaljivalinnat ole niin yksiselitteisiä. Vaihtoehdossa A on käytetty ruuvikiinnitysluokan A ruuveja, koska liukumista kestävä kiinnitys ei vaadittu vaan reunapuristustyyppinen kiinnitys riittää. Vaihtoehdossa B on käytetty ruuvikiinnitysluokan C ruuveja eli murtorajatilassa liukumista kestäviä ruuveja, koska kyseessä on maanjäristyskohde ja kitkaliitos. Sideliitos 4 pultilla ja 2 poskilevyllä variaatiossa A ja 12 pultilla ristiliitos ja 8 poskilevyllä vaihtoehdossa B. Eroavaisuuksia selittää liitosten kapasiteetit. Variaatio A on laskettu suoraan liitoksen tukivoimille ja vaihtoehto B siteen nurjahduskapasiteetille. Vaihtoehdossa A on otettava huomioon päätylevyn lamellirepeilyn vaara ja vipuvoimien syntyminen. Todellisuudessa sideliitossolmuliitosten valinta ei ole joko tai vaihtoehtojen välillä, vaan vaihtoehtoja ja muuttujia on monia. [5]



Kuva 24. Sidelitossolmu vaihtoehto A. [10]



Kuva 25. Sidelitossolmu vaihtoehto B. [10]

5. ESIMERKKI: KATTILALAITOKSEN MASSA-ARVIO

Sovelletaan tutkimustuloksia käytännön tapaukseen. Arvioidaan pienikokoisen kattilalaitoksen teräsrungon massaa perustuen vanhoihin tietoihin (kattilalaitosten tietokantaan) sekä esimitoittamalla. Oletetaan, etteivät lähtötiedot muutu projektin kuluessa.

5.1 Lähtötiedot

Suunnittelutehtävänä on arvioida teräsrakenteisen kattilalaitoksen kattilarakennuksen teräsrungon massa. Kattilalaitos sijaitsee Länsi-Euroopan maassa ja sen mitat ovat 30m x 18m x 20 m (korkeus x leveys x pituus). Kattilarakennuksen tilavuus on 10 800 m³. Kohteessa ei esiinny merkittäviä maanjäristyksiä. Kattila on tuettu alhaalta eli perustettu teräsbetonianturoille ja tarvittaessa teräsrakenteisille pukeille. Lähtötietoina on kattilarakennuksen perustustason kuormituspiirustus, taso- ja leikkauspiirustus.

5.2 Massa-arvio esimitoituksen ja tietokannan avulla

Johtuen esimerkin kattilalaitoksen pienestä koosta, nopeimmin massa-arvion saa mallintamalla *Tekla Structures* -ohjelmalla esimitoitettut rakenteet. Ensin *layout*-piirustukset viedään Teklaan referensseiksi. Mahdollisimman hyvää mallinnuskuria noudattamalla mallista saa tarvittaessa varsinaisessa suunnitteluvaiheessa paljon hyötyä. Hyvä mallinnuskuri tarkoittaa sitä, että kaikkien päärungon rakenteiden referenssiviivat kohtaavat, epäkeskisyyksiä ei sallita, numerointi- ja nimikointiohjeita noudatetaan mahdollisimman tarkasti. Mallinnuksen ohella erilliset rakenneosat mitoitetaan sisäisellä teräsprofiilien laskentapohjalla, jonka oli toteuttanut Ville Lehtimäki [23]. Pystysuuntainen jäykistysristikko mitoitetaan *Robot Analysis* -ohjelmalla. Kattilalaitosten tietokanta on hyödynnetty tässä siten, että jos ei heti keksi mitä profiilia voisi käyttää, asian voi tarkistaa tietokannasta. Samoin jäykistysjärjestelmän suunnittelussa tietokannasta on hyötyä.

Esimitoitusta varten kartoitetaan mitoituskuormat (nämä löytyvät kätevästi kattilalaitosten tietokannasta samaan maahan rakennetusta kattilalaitoksen tiedoista kuin esimerkkitapaus):

Pysyvät kuormat:

Teräsrakenteet (tiheys 7850 kg/m³), eurooppalainen teräslaji S355 tai S235

Ritilät 0,7 kN/m² (30mm ritilä)

Kyynellevy 0,5 kN/m²

Kattorakenteet $0,5\text{kN/m}^2$

Seinärakenteet $0,3\text{kN/m}^2$

Kone-, putki- ja kanavakuormat tilaajan antamien erillisten tietojen perusteella tarkentuvat myöhemmin

Hyötykuormat:

Tasokuorma yleisesti $2,5\text{kN/m}^2$ ja pistekuorma 3kN

Tasokuormat nostoaukkojen yhteydessä 5kN/m^2

Betonitason hyötykuorma 5 kN/m^2

Lumikuorma maassa: $s_k = 1,2\text{kN/m}^2$

Kattokaltevuus 10 astetta

Tuulikuorma:

Tuulikuorman peruspaine $v_b=26\text{ m/s}$ (EN 1991-1-4:n kansallinen liite)

Maastoluokka II

Pinnanmuotokerroin $c_o=1,0$

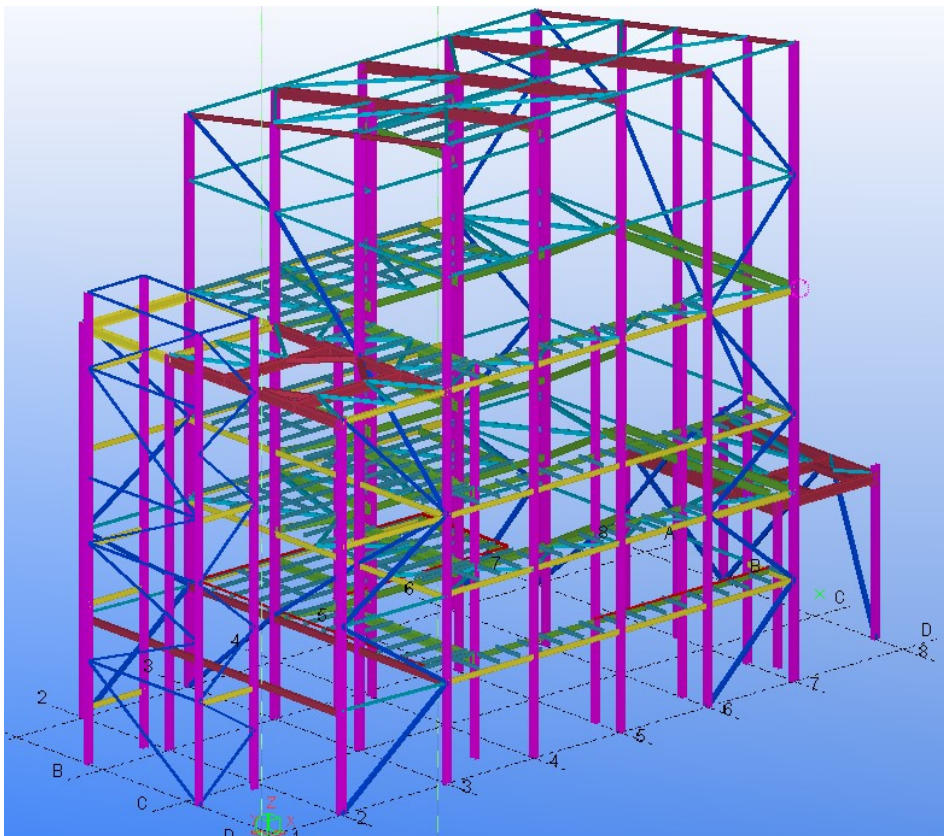
Pyörteisyyskerroin $k_1=1,0$

Nopeuspaineen kerroin $c_s c_d=1,0$ (EN 1991-1-4:n Liite D)

Nopeuspaineen perusarvo $q_b=0,42\text{ kN/m}^2$ (EN 1991-1-4:n kansallinen liite)

Sisäpaineen kerroin $c_{pi} = +0,2$ tai $-0,3$

Alustavat lähtötiedot ovat hyvin summittaiset. Kyseessä on kuitenkin tavanomaiselta vaikuttava kohde, niin mallinnus onnistuu hyvin. Rakennuksessa on kolme jäykistävää tasoa kattotaso mukaan lukien. Hoitotasoja on 5 kpl, joista ylin taso on pieni, lisäksi on yksittäisiä kulkutasoja. Yksinkertaistamisen vuoksi oletetaan, että palkisto on samanlaista kaikilla kulkutasoilla. Seinäsidejärjestelmän tyyppi on yksinkertainen. Pystysuuntaisia jäykistysjärjestelmiä on joka seinällä 1 kpl. Katon kannatustyyppinä on hitsatut 2- tai 3-aukkoiset palkit. Sekundääripalkkien jako on $1,2\text{ m}$ johtuen yleisimmästä ritilätyypin kantokyvystä. Kyynellevyjen alla olevan palkiston jako on $0,6\text{ m}$. Suurien laitteiden kannatuspalkit ja pilarit ovat I-hitsattuja palkkeja. Vinositeet ovat kylmämuovattuja putkiprofiileita. Sekundääripalkit kuumavalssattuja profiileita.



Kuva 26. Tekla Structures -ohjelmaan mallinnettu esimerkkikohde.

Esimitoitettavat rakenneosat massa-arvioita varten ovat:

- Sekundääripalkki
- Tason primääripalkki
- Kattopalkki
- Betonitasoa tukeva WQ-palkki
- Keskipilari B/4, B/5 ja B6
- Seinäpilari A/4-A/5
- Seinäjäykistysjärjestelmä yksinkertaistettuna ristikkona

Tietokannasta voidaan katsoa toteutuneita projekteja ja huomata, että vastaavan kokoinen kattilalaitos on jo toteutettu Eurooppaan, mutta siinä erona on maanjäristysmitoitusvaatimus. Tässä kohteessa teräsmäärät tulevat olemaan pienimmät, koska maanjäristysmitoitusta ei vaadita. Kattilalaitoksen keskimääräinen teräsmääräluku alta tuetussa kattilalaitoksessa on ollut $23,3 \text{ kg/m}^3$ (Taulukko 9). Tietokannasta voidaan poimia myös yleisimmin käytetyn profiilit edellä luetuille esimitoitettaville osille.

5.2.1 Sekundääripalkki

Sekundääripalkki on yleensä valssattu I-profiili, joka mitoitetaan yksiaukkoisena kantamaan pysyvien rakenteiden kuormaa (ritilä- tai kyynellevyaso) ja tasojen hyötykuormaa

(henkilöitä, tavaroita, pieniä laitteita). Sekundääripalkisto siirtää pystykuormia poikittain kulkevilla primääripalkeille. Sekundääripalkit näkyvät Kuva 26:ssa vaaleansinisinä. Kokemuksen mukaan ja tietokantaan perustuen Euroopassa rakennetuissa kohteissa sekundääripalkki on ollut useimmiten IPE180 tai IPE200. Kokeillaan ensimmäistä arvausta.

Pysyvät kuormat:

Teräsrakenteet (tiheys $\rho=7850\text{kg/m}^3$, aineen teräslaji S355 tai S235), jolloin IPE180 palkin omapaino on $18\text{ kg/m} = 0,18\text{ kN/m}$

Ritilät $0,7\text{ kN/m}^2$ (30mm ritilä)

Hyötykuorma:

Teollisuusrakennuksissa kulkutasojen hyötykuorma $q=2,5\text{ kN/m}^2$ ja pistekuorma $F=3\text{ kN}$ [20]. Sekundääripalkisto tavanomaisin k-jako on 1200 mm johtuen yleisimmästä ritilän kantopituudesta.

Käyttörajan kuormitustapaus:

$$q^{\text{KRT}} = 0,18\text{ kN/m} + (0,7\text{ kN/m}^2 + 2,5\text{ kN/m}^2) \cdot 1,2\text{ m} = 4,02\text{ kN/m}$$

$$F^{\text{KRT}} = 3\text{ kN}$$

Murtorajan kuormitustapaus:

$$q^{\text{MRT}} = 1,15 \cdot 0,18\text{ kN/m} + (1,15 \cdot 0,7\text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 2,5\text{ kN/m}^2) \cdot 1,2\text{ m} = 5,67\text{ kN/m}$$

$$F^{\text{MRT}} = 1,5 \cdot 3\text{ kN} = 4,5\text{ kN}$$

Tekla-mallista nähdään, että sekundääripalkin pisin jänneväli on $L=5\text{ m}$. Suurin osa sekundääreistä ovat kuitenkin 1,7-3,2m. Liitosten yhtenäistämisen takia sekundääriprofiili on hyvä olla pääsääntöisesti yksi eri jänneväleillä. Poikkeuksena suurten pistekuormien kohdalla.

$$\text{Taivutusmomentti } M = \frac{qL^2}{8} + \frac{FL}{4} = \frac{5,67\text{ kN/m} \cdot (5\text{ m})^2}{8} + \frac{4,5\text{ kN} \cdot 5\text{ m}}{4} = 23,4\text{ kNm}$$

Tässä kiepahdus estetään poikittaisella palkilla sekundääripalkin puolella välissä, jolloin kiepahduspituudeksi tulee $L/2 = 2,5\text{ m}$. Taipumarajana on $L/400$, joka on ominainen rajoitus välipohjapalkeille.

Sekundääripalkki on haarukkatuettu yksiaukkoinen palkki, jonka käyritystä ja kiertymistä on vapaa. Sekundääripalkin kestävyys mitoitetaan firman sisäisessä käytössä olevalla laskentapohjalla [23]. Käyttörajan tilassa mitoitetaan taipumaa ja murtorajan tilassa tai-

vutus-, leikkaus-, pistekuorma-, kiepahduskestävyyttä. IPE 180 teräslajilla S355J leikkauskestävyyden käyttöasteeksi saadaan 7,1%, taivutuskestävyyden käyttöasteeksi 39,6%, kiepahduskestävyyden käyttöasteeksi 69,1%, pistekuormakestävyyden käyttöasteeksi 9,1% ja taipuman käyttöasteeksi 88%. Eli käyttörajatilan taipuma tulee määrääväksi. Mallinnetaan kaikille kulkutasoille sekundääripalkit IPE180 profiilina *Tekla*-malliin, koska optimointi sekundääripalkeissa ei ole kannattavaa liitossuunnittelun vaikeutuksessa.

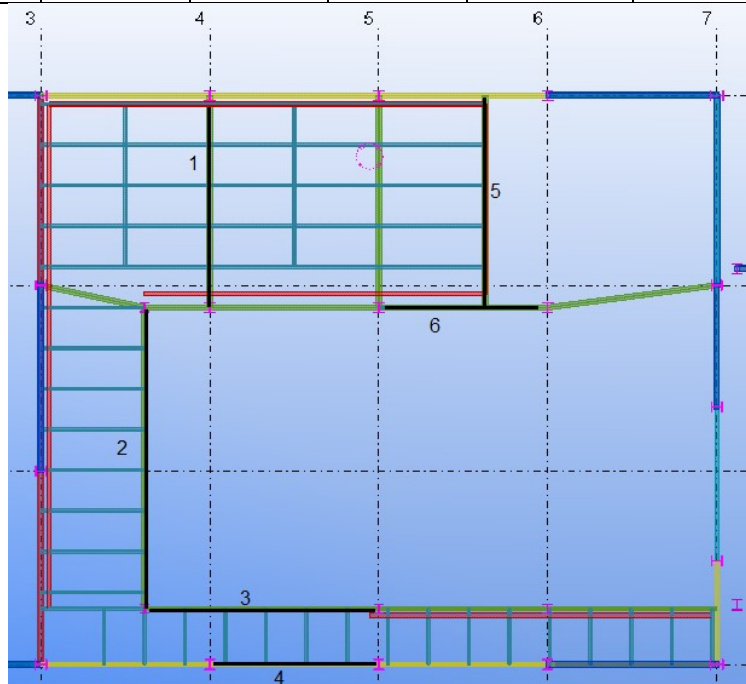
5.2.2 Tason primääripalkit

Primääripalkki on useimmiten joko valssattu tai hitsattu I-profiili, joskus myös kotelo-profiili. Casen Tekla-mallista pisimmät ja kuormitetuimmat palkit löytyvät Taulukko 14:sta ja Kuva 27:sta. Primääripalkit kantavan tasokuormia sekundääripalkistosta ja laitteiden sekä putkistojen pistekuormia. Tasokuormien ajatellaan siirtyvän tasaisena kuormana primääripalkeille. Tasokuorma on vakio näille, mutta kuormitusleveys vaihtelee. Kiepahdus primääripalkeissa ei ole estetty ja momenttipinnan muoto on tasainen kuorma primääripalkeissa 1-4. Primääripalkeissa 5-6 momenttipinnan muodon oletetaan olevan pistekuormat jänteen neljännespisteissä. Teräslajina näissä on S355.

$$\text{Neliökuorma } q^{\text{MRT}} = (1,15 \cdot 1 + 1,5 \cdot 2,5) \text{ kN/m}^2 = 4,9 \text{ kN/m}^2$$

Taulukko 14. *Primääripalkit Case Tekla-mallissa.*

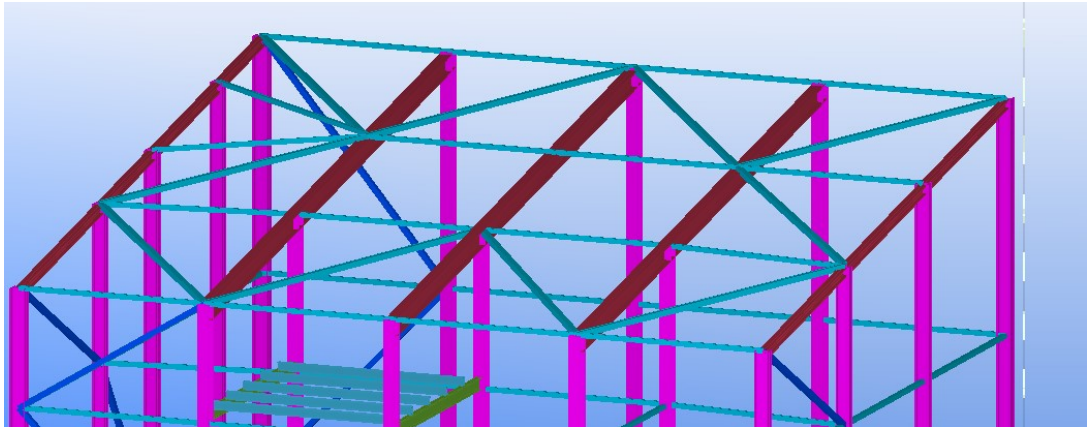
<i>nro</i>	<i>profili</i>	<i>jänne- väli L (m)</i>	<i>kuormi- tusle- veys (m)</i>	q^{MRT} (kN/m)	F^{MRT} (kN)	M_{Rd} (kNm)	<i>käyttöaste (%), määrävä</i>
1	IPE400	6,3	5	24,5	-	121,6	87,3 <i>kiepahdus</i>
2	IPE400	8,9	1,5	7,35	-	72,8	78,2 <i>kiepahdus</i>
3	IPE240	6,9	0,9	4,41	-	26,2	87,2 <i>kiepahdus</i>
4	IPE200	5	0,9	4,41	-	13,8	63,93 <i>kiepahdus</i>
5	IPE270	5,6	1,6	7,84	2x7,5	48,4	93,9 <i>kiepahdus</i>
6	IPE300	5	-	-	30,6		78,5 <i>kiepahdus</i>

**Kuva 27.** *Primääripalkit Case Tekla-mallissa.*

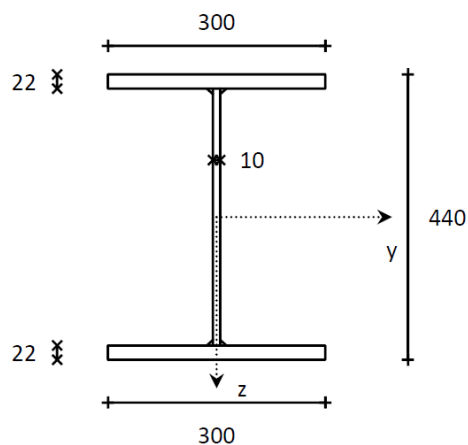
Useimmiten IPE-profiilia käytettäessä määrääväksi tulee kiepahduskestävyys johtuen profiilin hoikkeudesta. IPE on kuitenkin kilojen suhteen edullisempi kuin HEA. Lisäksi IPE:n korkeus tekee liitosten teosta helppoa, koska ruuviryhmät mahtuvat hyvin. Esimerkiksi primääripalkin nro 5 korvaava profiili olisi ollut HEA220 (käyttöaste 69,5% taipuman ollessa määräävä). HEA220 painaa 50,5kg/m, kun taas IPE270 painaa 36,1kg/m. Kilosäästö on n.40%. Primääripalkille nro 4 käyttöasteelle on jätetty varaa mahdollisille normaalivoimakuormituksille, jotka tulevat pilareista.

5.2.3 Kattopalkki

Kattopalkit ovat rakennuksen keskellä 2-aukkoisia ja reunoilla 3-aukkoisia (Kuva 28). Kuljetuspituuksista johtuen palkit on kuitenkin järkevää katkaista pilareiden kohdalta. Sen takia esimitoitus suoritetaan kuten 1-aukkoiselle palkille. Keskimmäisen kattopalkin pisin jänneväli on $L=10,7$ m, kattokaltevuuden ollessa 10 astetta. Valitaan alustavaksi profiiliksi hitsattu I-palkki: 440x10-22x300 (Kuva 29).



Kuva 28. Kattopalkit punaisina.



Kuva 29. Kattopalkin hitsattu profiili 440x10-22x300.

Pysyvät kuormat:

Eristyslevyt $0,5 \text{ kN/m}^2$

Profiilin omapaino $1,35 \text{ kN/m}$

Hyötykuorma:

Teollisuusrakennuksissa kattotasojen hyötykuorma $q = 2,5 \text{ kN/m}^2$ [20].

Lumikuorma maassa $1,2 \text{ kN/m}^2$

Lumikuorma katolla $0,8 * 1,2 \text{ kN/m}^2 = 0,96 \text{ kN/m}^2$

Käyttörajan tilan kuormitustapaus:

$$q^{\text{KRT}} = 1,35 \text{ kN/m} + (0,5 + 0,7 * 0,96 \text{ kN/m}^2 + 1 * 2,5 \text{ kN/m}^2) * 5 \text{ m} = 19,7 \text{ kN/m}$$

Murtorajan tilan kuormitustapaus:

$$q^{\text{MRT}} = 1,15 * 1,35 \text{ kN/m} + (1,15 * 0,5 \text{ kN/m}^2 + 0,7 * 1,5 * 0,96 + 1 * 1,5 * 2,5 \text{ kN/m}^2) * 5 \text{ m} = 28,2 \text{ kN/m}$$

$$\text{Taivutusmomentti } M = \frac{qL^2}{8} = \frac{28,2 \text{ kN/m} * (10,7 \text{ m})^2}{8} = 403,8 \text{ kNm}$$

Taipumaraja kattotasossa $L/300$. Teräslajina on S355.

Tuloksena käyttöasteiksi saadaan taivutuskestävyys 35,5%, leikkauskestävyys 15,2%, taivutus- ja normaalivoimakestävyys 35,5%, taivutus- ja puristuskestävyys, stabiilisuu-den menetys 98,3%, kiepahduskestävyys 98,3%, pistekuormakestävyys 33,9%, taipuma 75,4%. Tässä palkissa stabiilisuu-den menetys murtorajan tilassa on ollut määräävä.

5.2.4 Betonitason WQ-palkki

Polttoainesiilon alla oleva taso on betonitaso, joka toteutetaan ontelolaatoista ja pintavalusta. Taso tuetaan reunoiltaan hitsatuille koteloprofiileiden päälle. Palkit ovat jänneväliltään 5,7m.

Ontelolaatasto O27 ja pintavalun 80 mm omapaino:

Ontelolaatan paino saumattuna on $380 \text{ kg/m}^2 = 3,8 \text{ kN/m}^2$. Pintavalun tiheys on 2500 kg/m^3 ja omapaino $0,08 \text{ m} * 25 \text{ kN/m}^3 = 2 \text{ kN/m}^2$. Ontelolaatat ovat 6,1m pitkiä.

Hyötykuorma tasolla on $q = 5 \text{ kN/m}^2$.

Viivakuormaa hitsatulle palkille:

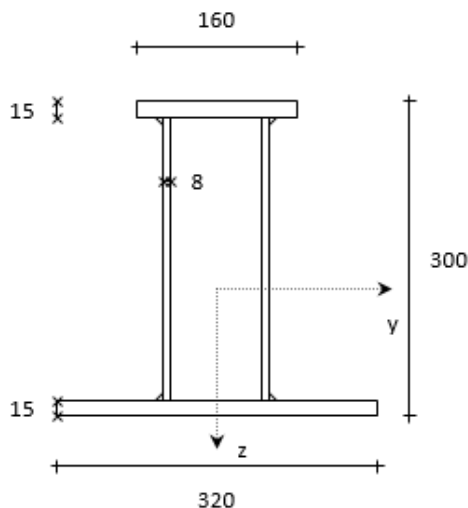
$$q^{KRT} = (3,8 + 2 + 5) \text{ kN/m}^2 * (6,1/2) \text{ m} = 32,9 \text{ kN/m}$$

$$q^{MRT} = 1,15 * (3,8 + 2) \text{ kN/m}^2 * 3,05 \text{ m} + 1,5 * 5 \text{ kN/m}^2 * 3,05 \text{ m} = 43,2 \text{ kN/m}$$

$$M = \frac{\frac{43,2 \text{ kN}}{\text{m}} * (5,7 \text{ m})^2}{8} = 175,5 \text{ kNm}$$

Hitsatun profiilin saa aina optimoitua hyvinkin tarkasti. Ontelolaattatason tapauksessa WQ-palkin alalaipan reunaehtoina on riittävä tukipinta ontelolaatalle ja saumaraudoituksen mahtuminen sekä korkeudeltaan sopiva palkki. Tässä tapauksessa alalaipan ”uloke” uumasta on hyvä olla vähintään 100mm. Tämä mitoitus ei ole TRY:n normikortin mukainen, mutta riittävää massa-arvioita varten.

Kyseiselle kuormitukselle sopiva hitsattu WQ-profiili voisi olla Kuva 30:n mukainen. Mitoittava tekijä tässä on taipuma (95,6%). Taivutuskestävyys 41,2%, leikkauskestävyys 11,9%, kiepahduskestävyys 45,8%, pistekuormakestävyys 19,8%.

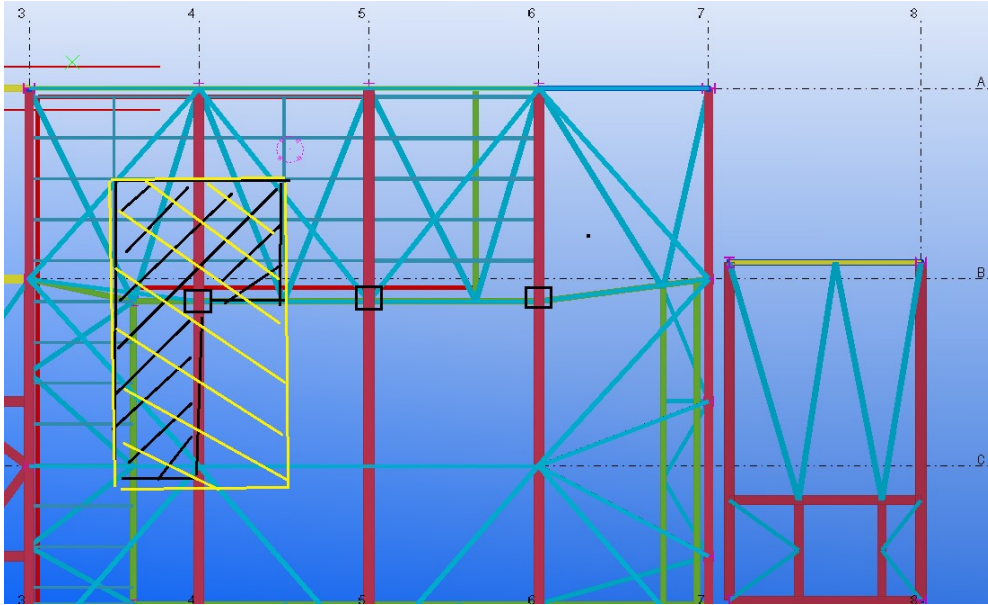


Kuva 30. Ontelolaattatasoa tukeva hitsattu WQ-profiili 320x15-270x8-160x15.

5.2.5 Keskipilarit B/4 – B/6

Keskipilareiden ajatellaan kantavan tasokuormia tasoilta ja katolta. Esimitoituksessa vaakakuormien ei oleteta siirtyvän keskipilareille. Keskipilari on kolmesta keskipilarista linjalla B kuormitetuin ja sen takia valitaan se esimitoitettavaksi. Kyseinen pilari kerää tasokuormia neljältä kulkutasolta pinta-alaltaan 26 m² ja katolta pinta-alaltaan 45 m².

Tasojen pysyvä kuorma olkoon palkkien painojen kanssa 1,5 kN/m² ja hyötykuorma pääsääntöisesti 2,5 kN/m².



Kuva 31. Keskipilari B/4:n keräämä tason pystykuorma yliviivoitettuna mustalla ja katon pystykuorma keltaisella.

Kuormat tasoilta:

$$F_{KRT, Taso} = (1,5 + 2,5) \text{ kN/m}^2 * 26 \text{ m}^2 = 104 \text{ kN/taso}$$

$$F_{MRT, Taso} = 1,15 * (1,5 \text{ kN/m}^2) * 26 \text{ m}^2 + 1,5 * 2,5 \text{ kN/m}^2 * 26 \text{ m}^2 = 142,4 \text{ kN/taso}$$

Kuormat katolta:

$$F_{KRT, Katto} = (1,5 + 2,5) \text{ kN/m}^2 * 45 \text{ m}^2 = 180 \text{ kN}$$

$$F_{MRT, Katto} = 1,15 * (1,5 \text{ kN/m}^2) * 45 \text{ m}^2 + 1,5 * 2,5 \text{ kN/m}^2 * 45 \text{ m}^2 = 246,4 \text{ kN}$$

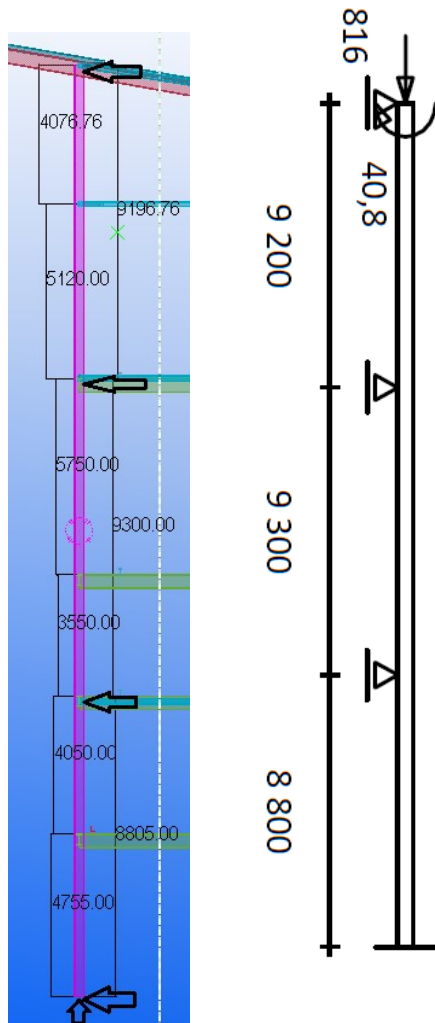
Pystykuormat yhteensä B/4 pilarille:

$$F_{KRT, PILARI B/4} = 104 \text{ kN/taso} * 4 + 180 \text{ kN} = 596 \text{ kN}$$

$$F_{MRT, PILARI B/4} = 142,4 \text{ kN/taso} * 4 + 246,4 \text{ kN} = 816 \text{ kN}$$

Pystykuorman epäkeskisyys otetaan huomioon määrittämällä epäkeskisyysmomentti $M_{y,Ed} = 816 \text{ kN} * 0,05 \text{ m} = 40,8 \text{ kNm}$

Pilari B/4 on 27,4 m korkea. Jäykistävien tasojen kohdalta se on tuettu vahvimmassa suunnassa 9,2 m, 9,3 m ja 8,8 m välein. Heikommassa suunnassa se on tuettu joka tasolta 4,1 m, 5,1 m, 5,8 m, 3,6 m, 4,0 m ja 4,8 m välein. Nurjahduspituudeksi z-akselin suhteen valitaan 9,3 m ja y-akselin suhteen 5,8 m.

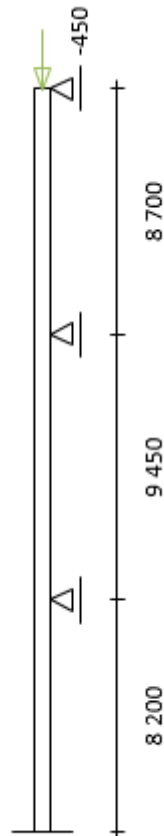


Kuva 32. Pilari B/4 Tekla-mallissa ja rakennemalli.

N-M yhteisvaikutus laskettuna menetelmällä 1 antaa taivutus- ja puristuskestävyyden stabiilisuuden menettämiselle z-akselin suhteen käyttöasteeksi 82,2% ja menetelmällä 2 laskettuna 81,7%. Teräslaji on S355. Profiili HEA300. Kopioidaan sama profiili alustavasti kaikkiin keskipilareihin.

5.2.6 Seinäpilarit A4/A5

Seinäpilari A/4 kantaa tasokuormia neljältä tasolta ja yläpohjalta. Kuormituspinta-ala sekä tasolta että katolta on $3 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 15 \text{ m}^2$. Pilari A/4 on 26,3 m pitkä ja se on tuettu jäykistäviltä tasoilta vahvemman y-akselin suunnassa 8,2m, 9,45m ja 8,7m välein sekä muilta tasoilta heikomman z-akselin suunnassa 4,8m, 3,9m, 3,7m, 5,8m, 5,1m ja 3,1m välein.



Kuva 33. Seinäpilarin A/4 rakennemalli.

Kuormat tasoilta:

$$F_{KRT, Taso} = (1,5 + 2,5) \text{ kN/m}^2 * 15 \text{ m}^2 = 60 \text{ kN/taso}$$

$$F_{MRT, Taso} = 1,15 * (1,5 \text{ kN/m}^2) * 15 \text{ m}^2 + 1,5 * 2,5 \text{ kN/m}^2 * 15 \text{ m}^2 = 82,125 \text{ kN/taso}$$

Kuormat katolta:

$$F_{KRT, Katto} = (1,5 + 2,5) \text{ kN/m}^2 * 15 \text{ m}^2 = 60 \text{ kN}$$

$$F_{MRT, Katto} = 1,15 * (1,5 \text{ kN/m}^2) * 15 \text{ m}^2 + 1,5 * 2,5 \text{ kN/m}^2 * 15 \text{ m}^2 = 82,125 \text{ kN}$$

Pystykuormat yhteensä A/4 pilarille:

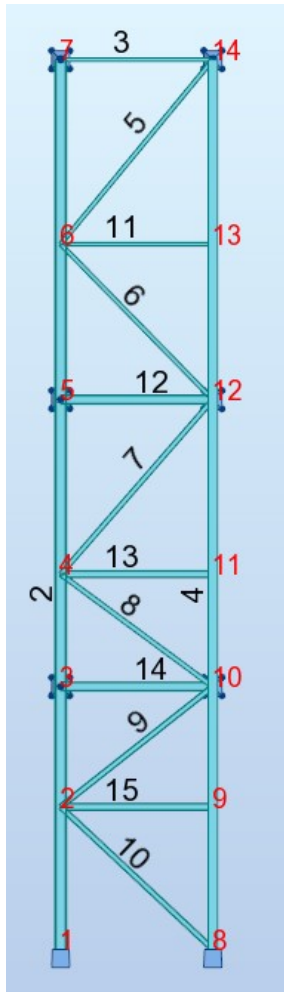
$$F_{KRT, PILARI A/4} = 60 \text{ kN/taso} * 4 + 60 \text{ kN} = 300 \text{ kN}$$

$$F_{MRT, PILARI A/4} = 82,125 \text{ kN/taso} * 4 + 82,125 \text{ kN} = 411 \text{ kN}$$

N-M yhteisvaikutus laskettuna menetelmällä 1 antaa taivutus- ja puristuskestävyyden staabiilisuuden menettämiselle z-akselin suhteen käyttöasteeksi 45,0 % ja menetelmällä 2 laskettuna 41,71 %. Teräslaji on S355. Profiili HEA300. Kopioidaan sama profiili alustavasti kaikkiin seinäpilareihin.

5.2.7 Pystysuuntainen jäykistysjärjestelmä

Mitoitetaan pystysuuntaisen jäykistysjärjestelmän ristikon sauvat Robot Structures -ohjelmalla. Kuva 34:ssä näkyy rakenne Tekla-mallissa sekä laskentaohjelmassa. Rakenne on mallinnettu 2D-rakenteena ja on sivusiirtymätön, joka tarkoittaa sitä, että sillä on oltava riittävä jäykkyys vaakakuormia vastaan. Vaakakuormat käsittävät tuulikuormia ja alkuvuonoudesta aiheutuvia lisävaakakuormia.[21] Jälkimmäiset jätetään tässä esimitoituksen yhteydessä huomioon ottamatta yksinkertaistamisen vuoksi.



Kuva 34. Pystysuuntaisen jäykistysjärjestelmän ristikko linjalla D.

Kun tuulee lyhyelle sivulle eli päädtyyn, tuulenpaine on kyseiselle sivulle:

$$q_{1,\text{tuuli}} = 0,930 \text{ kN/m}^2 \text{ eli ristikolle } q_{1,\text{tuuli}} = 0,93 \text{ kN/m}^2 * (16,8/2) \text{ m} = 7,80 \text{ kN/m}$$

Kun tuulee pitkälle sivulle, tuulenimu on päädyllä:

$$q_{2,\text{tuuli}} = -1,1845 \text{ kN/m}^2 \text{ eli ristikolle } q_{2,\text{tuuli}} = -1,1845 \text{ kN/m}^2 * (16,8/2) \text{ m} = -9,95 \text{ kN/m}$$

Katolta tuleva kuorma $F_1 = 42 \text{ kN}$ on reunimmaisen kattopalkin tuoma kuorma ja $F_2 = 157,7 \text{ kN}$ on keskimmäisen kattopalkin tuoma kuorma. Kuormat ovat murtorajatilan

kuormia ja näissä on mukana katon omapaino, lumikuorma ja katon hyötykuorma alla olevien tietojen ja laskujen mukaisesti.

Omapaino katolla $q_{\text{omapaino, katto}} = 1 \text{ kN/m}^2$

Lumikuorma katolla $q_{\text{lumi, KRT}} = 0,8 * 1,2 \text{ kN/m}^2 = 0,96 \text{ kN/m}^2$

Hyötykuorma katolla $q_{\text{hyöty, katto}} = 2,5 \text{ kN/m}^2$

Vasemman puoleinen pilari kerää kattokuormaa $(5,7\text{m}/2) * 2,5\text{m} = 7,125\text{m}^2$ alueelta

$F_1 = (1,15 * 1\text{kN/m}^2 + 1,5 * 1 * 2,5 \text{ kN/m}^2 + 1,5 * 0,7 * 0,96 \text{ kN/m}^2) * 7,125 \text{ m}^2 = 42 \text{ kN}$

kuitenkin vähintään: $F_1 = 1,35 * 1 \text{ kN/m}^2 * 7,125 \text{ m}^2 = 9,62 \text{ kN}$

Oikean puoleinen pilari kerää kattokuormaa $(10,7\text{m}/2) * 5\text{m} = 26,75 \text{ m}^2$

$F_2 = (1,15 * 1\text{kN/m}^2 + 1,5 * 1 * 2,5 \text{ kN/m}^2 + 1,5 * 0,7 * 0,96 \text{ kN/m}^2) * 26,75 \text{ m}^2 = 157,7 \text{ kN}$

kuitenkin vähintään: $F_2 = 1,35 * 1 \text{ kN/m}^2 * 26,75 \text{ m}^2 = 36,11 \text{ kN}$

Kuormat syötetään ominaiskuormina ja erillisinä kuormitustyyppinä Robot -laskentaohjelmaan seuraavasti:

DL1 solmuun 7: $1\text{kN/m}^2 * 7,125 \text{ m}^2 = 7,13 \text{ kN}$

DL1 solmuun 14: $1\text{kN/m}^2 * 26,75 \text{ m}^2 = 26,7 \text{ kN}$

SN1 solmuun 7: $0,96 \text{ kN/m}^2 * 7,125\text{m}^2 = 6,84 \text{ kN}$

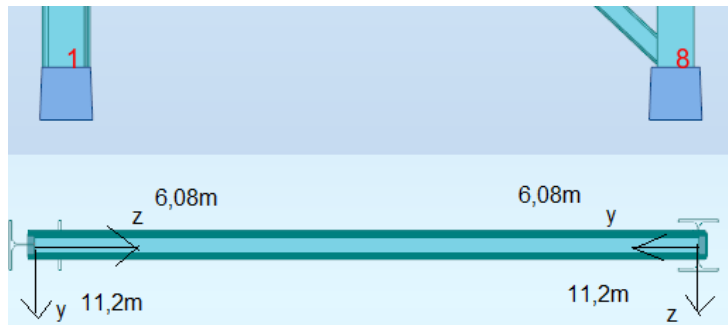
SN1 solmuun 14: $0,96 \text{ kN/m}^2 * 26,75 \text{ m}^2 = 25,68 \text{ kN}$

LL1 solmuun 7: $2,5 \text{ kN/m}^2 * 7,125 \text{ m}^2 = 17,81 \text{ kN}$

LL1 solmuun 14: $2,5 \text{ kN/m}^2 * 26,75 \text{ m}^2 = 66,88 \text{ kN}$

WIND1: sauvalle 2: $-1,185 \text{ kN/m}^2 * (16\text{m}/2) = -9,95 \text{ kN/m}$

Pilareiden nurjahduspituudeksi on määrätty tasojen välinen maksimi etäisyys 6,1m ja jäykistävien tasojen välinen maksimi etäisyys 11,2 m. Kyseisen jäykistysristikon pilarit ovat eri suuntaan. Siteiden nurjahduspituus on jännevälinsä mittainen ja palkkien kiepahduspituus on jännevälinsä mittainen.



Kuva 35. Pilareiden lokaalit akselit ja niiden mukaan nurjahduspituudet.

Taulukossa 15 on esitetty pystysuuntaisen jäykistysristikon profiileiden käyttöasteet.

Taulukko 15. Pystysuuntaisen ristikon profiilit ja niiden käyttöaste.

sauvan nro	profiili	käyttöaste %
2	HEA400	46
4	HEA320	36
3 11	CFRHS120x120x5	5
14 12	IPE300	42
15 13	IPE240	80
9 10	CFRHS180x180x8	28
7 8	CFRHS160x160x6	28
5 6	CFRHS140x140x5	20

5.3 Massa-arvio ja yhteenveto

Taulukko 8:n mukaan kattilalaitoksen teräsmassaltaan painavimmat rakenneosat ovat seinäpilarit 13,6%, tavanomaiset primääripalkit 12,6%, sekundääripalkit 9,2%, keskipilarit 6,1% ja seinäsiteet 3,2%. Luvussa 5 *study case* -tapauksessa on siis keskitetty esimitoittamaan juuri kyseiset rakenneosat, koska nämä ovat massoiltaan merkittävimmät teräsrunkoisen kattilarakennuksen osat. Taulukon 8 tiedot on toistettu tässä Taulukon 16:n oikeassa sarakkeessa vertailua varten.

Case esimerkin kokonaismassa on 210 000 kg. Tämä vastaa teräsmassalukua $19,4 \text{ kg/m}^3$. Esimerkin arvio on siis pienempi, kuin keskimääräisestä alta tuetun kattilarakennuksen

massa 23,33 kg/m³ (Taulukko 9). Poikkeama sallitaan kokemukseen nojautuen. Esimerkitapauksen kilojakauma on eriteltynä Taulukko 16:ssa. Muut rakenneosat käsittävät sekundäärisiä osia: portaiden reisolankkuja, kaiteita ja tikkaita. Muissa laitoksissa nämä osat on käsitelty vaihtelevasti. Joskus ne ovat olleet urakan ulkopuolella. Liitoslevyt ja irtosat käsittävät levyjä ja pulttien painoja.

Taulukko 16. Teräskilojen jakauma esimerkin laitoksessa verrattuna muihin laitoksiin.

Teräskilojen jakauma esimerkkilaitoksessa:

	Case (kg)	Case (%)	Muiden laitosten %
Seinäpilarit	60630	28,8	13,6
Tavalliset primääripalkit	13800	6,6	12,6
Kattilapilarit	0	0,0	12,1
Sekundääripalkit	10300	4,9	9,2
Pitkät (yli 6 m) primääripalkit	25200	12,0	9,0
Kattilapalkit	0	0,0	6,2
Muut keskipilarit kuin kattilapilarit	12800	6,1	6,1
Seinäsiteet	9900	4,7	3,2
Muita isoja laitteita tukevat palkit	8800	4,2	3,2
Tasositeet	15000	7,1	2,3
Jäykistysjärjestelmään kuuluvat palkit	5900	2,8	1,8
Muut primäärirungon osat	22000	10,5	1,2
Liitoslevyt ja irtosat	26000	12,4	10,4
Yhteensä:	210330		

Vertaillaan *study case* -tapauksen ja muiden laitosten rakenneosien keskimääräisten kilomäärien osuuksien eroja (Taulukko 16). Seinäpilareiden reilusti suurempaa osuutta selittää se, että kyseisessä kattilalaitoksessa ei ole tuentatavan takia kattilapilareita. Joskus kattilapilarit ovat samalla seinä- tai keskipilareita, jolloin ne kantavat myös osan hoitotasosta ja laitteista. Tavallisten primääripalkkien ja pitkien primääripalkkien yhteisous on samaa luokkaa kuin muissakin laitoksissa. Pituudet tarkentuvat vasta varsinaisessa suunnitteluvaiheessa. Sekundääripalkkien osuus on ilmeisesti arvioitu hiukan kevyemmäksi kuin yleensä, johtuen myös varmaankin lähtötietojen niukkuudesta. Luultavasti hoitotasoa on enemmän ja nekin tarkentuvat suunnittelun edistyessä. Pitkien primääripalkkien isompaa osuutta selittää myös kattilapalkkien puuttuminen. Ja muutenkin palkkien lopullista pituutta laitoksessa on vaikea arvioida etukäteen. Tasositeiden osuus on suurempi kuin muissa laitoksissa johtuen siitä, ettei vaakasuuntaisia jäykistysjärjestelmiä esimitoitettu, vaan profiilit valittu kattilalaitosten tietokannan mukaan.

Taulukko 17:ssä vertaillaan *study case* -esimerkin massa-arvion profileita yleisemmin käytettyihin profileihin vastaavanlaisessa kattilarakennuksessa (profileina tai profileiden keskimääräisinä metripainoina (kg/m)). Keskimääräinen metripaino kg/m saadaan

jakamalla kyseisen rakenneosan kokonaismassa kyseisen rakenneosan kokonaispituudella. Esimerkkitapauksen ja sitä vastaavankokoisen kattilalaitoksen tyypillisten rakenneosien profiilit vastaavat aika hyvin toisiaan. Vastaavan kattilalaitoksen teräsmassaluku oli $16,6 \text{ kg/m}^3$.

Taulukko 17. Case-esimerkin ja sitä vastaavan kattilalaitosrakennuksen yleisimpien profiileiden vertailu.

Rakenneosa	Case esimerkki	Vastaava kattilalaitos (M1)
Keskipilarit	HEA280	HEA240
Seinäpilarit	HEA320	HEA320
Seinäsiteet	22,5 kg/m	22,3 kg/m
Tasositeet	23,3 kg/m	15,6 kg/m
Jäykistysjärjestelmään kuuluvat palkit	35,2 kg/m	24,2 kg/m
Tavalliset primääripalkit	49 kg/m	51,9 kg/m
Pitkät (>6m) primääripalkit	73,6 kg/m	87 kg/m
Sekundääripalkit	IPE 180 eli 18,8 kg/m	24,4kg/m

Alustavan mitoituksen aikana täytyisi reagoida lähtötietojen puutteisiin ja epäjohtonmukaisuuksiin mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Pilareiden epäjärkevä sijoittaminen voi olla estettävissä projektin varhaisessa vaiheessa. Ainakin kannattaa kysyä layoutsuunnittelijalta, mikä on epäedullisen ratkaisun takana. Syy voi olla ihan inhimillinen ja helposti korjattavissa. Teollisuusrakennuksissa kannattaa pitää kiinni mahdollisimman yksinkertaisista ratkaisuista, koska arkkitehtonisia, silmää miellyttäviä vaatimuksia on harvoin mukana. Mallinnettaessa on varmistettava, että jokainen pilari on kytketty jäykistysjärjestelmään: joka tasolta heikommassa suunnassa ja jokaiselta jäykistävän tason kohdalta vahvemmassa suunnassa.

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli kartoittaa teräsrunkoisten kattilalaitosten suunnittelun vaikeudet ja ongelmat. Tutkimusmenetelminä käytettiin asiantuntijahaastatteluita ja projektikansioiden läpikäymistä ja projektitietoihin tutustumista. Samalla piti täydentää kattilalaitosten tietokantaa, jotta kerätty tieto säilyy ja välittyy uusille työntekijöille.

6.2 Tulokset

Tämä työn tuloksina saatiin kerättyä ja analysoitua rakennesuunnittelijoiden kokemuksia aikaisemmista projekteista. Haastatteluiden pohjalta saatiin tunnistettua kehittämistä vaativia asioita suunnittelutyössä.

Tämän diplomityön aikana täytetty kattilalaitosten tietokannan teräsmääräluvut vertailtiin aiemmin tehtyihin jälkilaskentalistoihin ja referensseissä esitettyihin teräsmääriin. Luvut vastasivat aika hyvin toisiaan ja ovat näin olleen uskottavia. Kaikki alussa esitetyt huomiot todettiin uusien teräsmäärälukujen valossa oikeiksi: ”alhaalta tuetun kattilalaitoksen teräsrunko on kevyempi kuin ylhäältä tuettu”, ”maanjäristyskohteeseen rakennetun kattilalaitoksen teräsrunko on painavampi” ja ”pilareiden liitoslevyissä on suurin teräsmekki”. Projektin tehokkuusluku (kg/h) ei korreloi projektin onnistumisen kokemuksen kanssa. Painavampi runko on saatettu toteuttaa nopeassakin aikataulussa.

Case-esimerkin valossa todettiin, että kattilarakennuksen teräsrungon massa-arvio on mahdollista tehdä tukeutumalla vanhoihin tietoihin (kattilalaitosten tietokantaan) ja yksittäisten rakenneosien esimitoitukseen sekä karkeaan tietomallinnukseen. Tämä on mahdollista tiukan aikataulun puitteissa vain, jos rakennus on kooltaan pienehkö.

6.3 Johtopäätökset ja jatkotutkimusehdotukset

Jatkokehitysehdotuksena on *BIM*-sovellus, joka ajaisi toteutuneen projektin *Tekla*-mallista tarvittavia tietoja suoraan excel-tietokantaan. Siinä ohitettaisiin tietojen käsin hakeaminen. Jatkoa ajatellen ainakin teräsmäärälukujen poiminta mallista voisi olla jollain tapaa automatisoitua, sillä tällä hetkellä pelkkien teräsmassojen yksityiskohtainen kirjaaminen vie n. työviikon/kattilalaitos. Toinen vaihtoehto *BIM*-sovellukselle on materiaalilistan ajaminen Teklasta sellaiseen muotoon, että se on suoraan hyödynnettävissä Terästietokanta-excelissa. Tämän mahdollistamiseksi ehdoton mallinnuskuri ja yhtenevä osien nimikointi ovat ensiarvoisen tärkeitä.

Vaikka *BIM*-sovellusta ei heti saataisikaan, pelkästään tietokannan ylläpitäminen uusien projektien kohdalla, on jo askel eteenpäin. Rinnakkaisena ideana on, voiko tietokanta olla toteutettu muutoin kuin excel-pohjaisena, esim. *SQL-database* -pohjaisena verkkopalvelimella. Jatkossa tutkimusta kannattaa ehdottomasti laajentaa kattamaan firman muiden yksiköiden kattilarakennuksia ja myös kerätä vastaavanlainen tieto kattilalaitosten oheisrakennuksista: siiloista, porrastorneista, huoltorakennuksista yms.

Haastattelujen lomassa kartoitettiin liitossuunnitteluun liittyviä kehitettäviä työkaluja. Seinäsideliitossolmujen ohella toinen kattilalaitosten tärkeä liitostyyppi on kattilapilari-kattilapalkki liitos. Sen suunnitteluun ei toistaiseksi löydy mitään sisäistä ohjekirjaa. Hyviksi tai kyseenalaisiksi havaittuja seikkoja tähän liitostyyppiin liittyen on kartoitettu tässäkin työssä luvussa 2 lyhyesti. Laajempi selvitys kattilapilari-kattilapalkki liitoksesta voisi olla hyödyllinen. Myös vertailu pilarijatkosliitostyypeistä (universaali- ja päätylevyliitos) voisi olla hyödyllinen: kumpi on kustannuksiltaan edullisempi ja kumpi on helpompi suunnitella ja mallintaa, kumpi ratkaisu vaikeampi ja virhealttiimpi asennusaikaisesti.

Tulosten yleistettävyyttä tukee se, että vastaavanlainen tietokanta ja tutkimus voidaan toteuttaa mille tahansa rakennustyyppille. Suunniteltaessa uutta on ensiarvoisen tärkeä tietää, mitä on tehty ennen ja miksi. Ainoata oikeata vastausta suunnittelussa ei koskaan ole, mutta on pyrittävä mahdollisimman hyvään ja kaikkia osapuolia miellyttävään ratkaisuun.

LÄHTEET

- [1] Diplomityöohje, Tampereen teknillisen yliopiston ohjeet [intranet], Tampere, 2013. Saatavissa: <https://www.tut.fi/pop> > Opiskelu > Diplomityö > Diplomityöohje
- [2] Hyvärinen, M., Nikander P., Ruusuvuori J., Aho A L., Tutkimushaastattelun käsikirja, 2017, 460 s.
- [3] Ruusuvuori J., Nikander P., Hyvärinen M., Haastattelun analyysi, 2010, 470 s.
- [4] Anita Saaranen-Kauppinen & Anna Puusniekka. 2006. KvaliMOTV - Menetelmäopetuksen tietovaranto [verkkojulkaisu]. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto [ylläpitäjä ja tuottaja]. <<http://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/>>. (Viitattu 22.08.2018.)
- [5] Sweco Rakennetekniikka Oy:ssä toteutetut asiantuntijoiden haastattelut: 14 haastateltavaa, kevät 2018, [ei julkisia]
- [6] EUROCODE 8. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8 Liitosten suunnittelu, luku 3.6
- [7] Petri Ongelin, Ilkka Valkonen, Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja, Ruukki, 2010, 3.painos, taulukko 3.26.
- [8] Teräsrakenneyhdistys, J.Kouhi, EUROCODE 3 Teräsrakenteiden suunnittelu - käsikirja, 1-8 Liitokset, 2015, 202 s.
- [9] Projektiaikataulu, projekti D2, Sweco Rakennetekniikka Oy, 2017, [ei julkinen]
- [10] Kattilalaitos tietokanta, Sweco Rakennetekniikka, 2018, [ei julkinen]
- [11] Vilpas Pertti, Metropolia, <https://users.metropolia.fi/~pervil/kvantsu/Moniste.pdf> (viitattu 27.8.2018)
- [12] Karjalainen Leila, Tilastotieteen perusteet, ISBN 978-952-9776-33-7, 2015, 2.painos
- [13] Kananen Jorma, Kvali, Kvalitatiivisen tutkimuksen teoria ja käytänteet, Jyväskylän Ammattikorkeakoulun Julkaisuja, ISBN 978-951-830-146-5, 2008
- [14] Kananen Jorma, Kvantti, Kvantitatiivinen tutkimus alusta loppuun, Jyväskylän ammattikorkeakoulu, ISBN 978-951-830-138-0, 2008

- [15] http://www.knowenergy.net/suomi/monipoltt_kattilat/5_0_hoyrykatt_periaate/fr_text.htm (viitattu 26.9.2018)
- [16] Artto K., Martinsuo M., Kujala J., Projektiliiketoiminta, 2006, 2.painos, ISBN 9789529285341, 420 s.
- [17] Salo P., Hybex-kattilalaitoksen rungon perussuunnittelun ja 3D-mallintamisen kehittäminen, Tampereen ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö, 2009
- [18] Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P., Pakkanen H., Höyrykattilatekniikka, 2000, Helsinki Oy Edita, 379 s.
- [19] Holopainen M., Pulkkinen P., Tilastolliset menetelmät, Sanoma Pro Oy Helsinki, 2015
- [20] SFS-EN 1991-1-1/AC:en, Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-1: General actions. Densities, self-weight, imposed loads for buildings, Vahvistettu 20.04.2009
- [21] EUROCODE 3 Käsikirja EN 1993-1-1, Eurocode 3 Teräsrakenteiden suunnittelu, Teräsrakenneyhdistys
- [22] Pirhonen Ilari, Fin plate -liitosten sitkeyden ja kiertymiskyvyn varmentaminen, Tampereen Teknillinen Yliopisto, diplomityö, 2016
- [23] Lehtimäki Ville, Teräsprofiilien laskentapohja, Tampereen Teknillinen yliopisto, diplomityö, 2014
- [24] Seppälä Jarmo, Kattilalaitoksen piirikohtaisten toimintakuvausten generointi, Tampereen Teknillinen Yliopisto, diplomityö, 2010

**LIITE A: TERÄSKILOJEN PROSENTUALINEN JAKAUMA KATTI-
LARAKENNUKSESSA TERÄSOSIEN VÄLILLÄ**

Teräskilojen jakauma kattilarakennuksessa rakenneseosien välillä (LUITE)		Muiden isojäsen												Koko kattilarakennuksen teräsmassa yhteensä [tn]						
Kohteen koodinumero		Muiden keskilapilaareiden osuus koko laitoksen massasta %				Tasosteiden osuus koko laitoksen massasta %				Jäykistysjärjestelmää tukevien palkkien osuus koko laitoksen massasta %				Piklien (L > 6 m) osuus koko laitoksen massasta %				Muiden primääripalkkien osuus koko laitoksen massasta %		Sekundääripalkkien osuus koko laitoksen massasta %
		Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %	Seinäpilaareiden osuus koko laitoksen massasta %		
A1	0,0	6,5	9,5	2,3	1,6	3,1	0,0	4,0	1,2	16,1	1,0	9,0	120							
B1	0,0	9,2	17,5	2,3	0,9	1,7	0,0	3,3	0,0	20,6	0,8	11,9	92							
C1	0,0	9,3	18,6	3,3	1,9	1,5	0,0	0,0	10,9	26,6	0,0	5,3	66							
D1	0,4	11,8	14,5	2,4	2,4	2,8	1,0	0,0	17,1	11,1	0,7	6,3	436							
E1	11,9	0,3	14,5	2,4	2,2	1,5	4,7	3,3	6,1	12,8	1,8	7,0	614							
F1	10,1	1,0	10,4	3,9	2,4	1,4	11,6	0,7	3,1	5,7	2,1	8,0	1919							
G1	12,7	0,0	14,2	2,3	2,8	2,9	7,1	2,0	6,1	9,2	1,1	9,6	1045							
H1	12,2	1,9	12,7	8,9	6,4	2,6	13,7	2,2	13,4	6,7	1,5	5,9	1924							
I1	5,8	0,0	12,0	2,1	2,1	2,2	4,3	2,9	10,8	10,9	2,2	11,9	858							
J1	0,2	8,2	17,6	1,7	3,7	2,0	1,2	3,9	14,6	7,5	0,3	12,7	484							
K1	14,9	0,0	15,9	3,8	1,9	1,0	8,4	0,0	6,0	11,5	0,8	6,9	480							
L1	10,9	2,7	16,1	2,8	3,3	1,5	6,2	1,3	10,4	6,4	0,5	7,1	1293							
M1	0,0	7,0	9,8	4,2	2,4	0,8	0,0	2,4	7,6	12,7	1,2	8,8	399							
O1	9,6	8,5	9,9	2,0	1,9	2,3	5,1	4,4	9,6	14,0	1,3	12,2	1247							
V1	9,7	8,6	11,6	1,7	1,2	1,6	4,2	3,7	8,1	20,4	0,0	14,7	1241							
A2	14,5	0,0	11,4	4,8	1,6	2,7	5,3	11,2	11,7	12,2	0,0	7,7	1600							
B2	19,8	0,4	15,1	2,2	1,6	0,0	1,7	2,0	12,9	10,6	5,8	14,4	1528							
J2	12,4	4,2	13,9	3,9	1,4	1,6	11,9	1,2	11,9	12,4	1,5	6,5	1406							
Maksimi	19,8	11,8	18,6	8,9	6,4	3,1	13,7	11,2	17,1	26,6	5,8	14,7								
Minimi	0,0	0,0	9,5	1,7	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	5,7	0,0	5,3								
Keskiarvo (%)	12,1	6,1	13,6	3,2	2,3	1,8	6,2	3,2	9,0	12,6	1,2	9,2								

LIITE C: LISTA KATTILALAITOS TIETOKANTAAN KERÄTYISTÄ TIEDOISTA

Projektin nimi	Palonkesto-vaatimus	Kuva seinäsiteistä (Y'Z)
Koodinumero		Kuva seinäsiteistä (X'Z)
Maa	Maanjäristyskohde?	
Paikkakunta	Onko kuoria?	Jäykistävien tasojen lukumäärä (kattotaso mukaan lukien)
Projektipäällikkö	Ulkopuolisten porrastornien lukumäärä	Pohjakuva
Laskija	Onko jokin porrastorneista kytketty kattilarakennukseen?	Keskipilarien lukumäärä (1 pilari = perustuksista katolle)
Korjaus vai uudiskohde?	Onko laitoksessa erillinen siilorakennus?	Keskipilarien tyyppi
Erikoista kohteessa		Keskipilarien profiili maan tasossa (yleisin)
Erikoista suunnittelussa	Onko laitoksessa erillinen suodinarakennus?	Keskipilarien profiili (yleisin)
Suunniteltiinko kokonaan		Keskipilarin peruspulttien lukumäärä (yleisin)
Kenen kattila?	Onko muita merkittäviä ulkopuolisia rakennuksia?	
Vuosiluku	Kattilan paino	Peruspulttien tyyppi (Peikon pultit / konepajalla tehdyt)
Käytetty TS versio	Muiden isojen laitteiden painot yhteensä	Keskipilarin peruspulttien halkaisija (yleisin)
Käytetty FEM-ohjelma	Tason hyötykuorma (ominaisarvo)	Keskipilarin pohjalevyn paksuus (yleisin)
Yhteenvedo projektista (Mitä meni pieleen, missä onnistuttiin ja mitä voidaan oppia?)	Tason pysyvä kuorma (ominaisarvo)	
Projektin hakemisto	Tuulikuorma rakennuksen kattotasolla	Keskipilarien jatkoksen tyyppi
Suunnitteluperusteiden polku	Lumikuorma maassa, ominaisarvo	Keskipilarien nurjahduspituus. Ly
Laskentaraportin polku	Maanjäristyksen PGA	Keskipilarien nurjahduspituus. Lz
Perustuskuorma-dokumentti	Suunnitteluspektrin maksimiarvo	Seinäpilarien lukumäärä (1 pilari = perustuksista katolle)
Korkeus	Käyttötymiskerroin	Seinäpilarien profiili maan tasossa (yleisin)
Leveys	Tuulesta x-suunnassa	
Pituus	Tuulesta y-suunnassa	Seinäpilarin perustusliitoksen tyyppi
Tilavuus	Maanjäristyksestä x-suunnassa	Seinäpilarin peruspulttien lukumäärä (yleisin)
	Maanjäristyksestä y-suunnassa	
Kattilarakennuksen teräsmäärä (primäärirunko + sekundäärit)	Oma paino, Runko	Seinäpilarin peruspulttien halkaisija (yleisin)
Hoitotasojen lukumäärä (selkeät isot välitasot)	Oma paino, Laitteet	Seinäpilarin pohjalevyn paksuus (yleisin)
Kaikkien hoitotasojen pinta-ala yhteensä	Oma paino, Tasot	
	Hyötykuorma, Laitteet	
Mitoituksessa käytetty normi	Hyötykuorma, Tasot	Seinäpilarien jatkoksen tyyppi
Teräslaatu ja käytetyt profiilit	Seinäside- järjestelmän tuunni	
Kattilan tuenta		
Kattilan tyyppi ja teho		

Seinäpilarien nurjahduspituus. Ly	Muiden isoja laitteita tukevien palkkien kokonaispituus	Siteiden liitososat
Seinäpilarien nurjahduspituus. Lz	Muiden isoja laitteita tukevien palkkien kokonaismassa	Primääripalkkien liitokset
Kattilapilarien kokonaispituus	Muiden isoja laitteita tukevien palkkien keskimääräinen pituusmassa	Sekundääripalkkien liitokset
Kattilapilarien massa	Pitkien (L > 6 m) primääripalkkien kokonaispituus	Muut liitos- ja varusteluosat
Kattilapilarien keskimääräinen pituusmassa	Pitkien (L > 6 m) primääripalkkien massa	Kattilarakennuksen primäärirungon teräsmassa yhteensä
Muiden keskipilarien kokonaispituus	Pitkien (L > 6 m) primääripalkkien keskimääräinen pituusmassa	Kattilarakennuksen sekundäärien teräsmassa yhteensä
Muiden keskipilarien massa	Tavallisten primääripalkkien kokonaispituus	Kattilarakennuksen ritilöiden ja kyynellevyjen teräsmassa yhteensä
Muiden keskipilarien keskimääräinen pituusmassa	Tavallisten primääripalkkien massa	Kattilarakennuksen muiden osien teräsmassa yhteensä
Seinäpilarien kokonaispituus	Tavallisten primääripalkkien keskimääräinen pituusmassa	Koko kattilarakennuksen teräsmassa yhteensä
Seinäpilarien massa	Muiden primäärirungon osien kokonaispituus	Primääripalkit
Seinäpilarien keskimääräinen pituusmassa	Muiden primäärirungon osien kokonaismassa	Tasopalkit
Seinäsiteiden kokonaispituus	Muiden primäärirungon osien keskimääräinen pituusmassa	Kattilapalkit
Seinäsiteiden kokonaismassa	Sekundääripalkkien profiili (yleisin)	Painavia laitteita tukevat palkit
Seinäsiteiden keskimääräinen pituusmassa	Sekundääripalkkien kokonaispituus	Vaakasiirtymä
Tasositeiden kokonaispituus	Sekundääripalkkien kokonaismassa	Tuntimäärä (kattilarakennus)
Tasositeiden kokonaismassa	Sekundääripalkkien keskimääräinen pituusmassa	kg/h-luku
Tasositeiden keskimääräinen pituusmassa	Muut sekundääriset teräsovat	Urakkahinta
Jäykistysjärjestelmään kuuluvien seinäpalkkien kokonaispituus	Pilarien pohjalevyt	
Jäykistysjärjestelmään kuuluvien seinäpalkkien kokonaismassa	Peruspultit	
Jäykistysjärjestelmään kuuluvien seinäpalkkien keskimääräinen pituusmassa	Pilarijatkokset	
Primääristen kattilapalkkien jänneväli	Pilarien liitososat yhteensä	
Primääristen kattilapalkkien profiili	Siteiden liitososat	
Kattilapalkkien kokonaispituus		

LIITE D: CASE STUDY: TARJOUSAINEISTON PERUSTEELLA PAINOARVIOTARJOUS

Lähtötietoina kaksi pohjakuvaa, perustustason kuormatiedot, leikkauspiirustus. Sijainti-
maa.

Arvioidaan teräsrungon massa, kartoitetaan kuormatiedot ja suunnitteluperusteet.

- > tietokannan perusteella, kokemuksen perusteella, mallintamalla ja esimitoittamalla erillisiä rakenneosia
- > jälkeen päin vertaillaan profiileita ja arvioita vastaavanlaiseen samaan maahan rakennettuun laitoksen teräsmäärään, joka löytyy tietokannasta
- > lisäksi teräsarvio rakenneosatyypeittäin vertaillaan muiden laitosten rakenneosien teräsmäärien osuuksiin (Taulukko 16)